

气象观测试验报告

2015年度



中国气象局大气探测综合试验基地

《气象观测试验报告 2015年度》编委会

主 编：郑国光

副 主 编：李良序 李 柏 吴可军 曹晓钟

主要编写人员：

陶 法 茆佳佳 胡树贞 张 明 莫月琴 郭 然 马舒庆

王志成 任晓毓 张雪芬 朱 君 李 敏 刘 磊 阳艳红

陈 挺 王小兰 刘 聪 雷 勇 陈 瑶

校 对：胡树贞 刘晓雪 王丽娜

责任编辑：张雪芬 莫月琴

终 审：李良序



序 言

气象观测数据是天气预报、气候预测、大气科学研究及服务的基础，直接关系到预报和服务的质量及效益，而观测装备性能优劣直接影响着观测数据的准确性与可靠性,开展设备研发试验、比对测试，是发现气象观测技术问题、改进和完善设备性能、确定业务技术体制、研究数据质量控制算法、建立业务流程、开展技术孵化等的重要环节。世界气象组织仪器和观测方法委员会（CIMO）十分重视气象仪器和方法的观测试验，在一些国家建立了CIMO的仪器测试基地和牵头中心，以此推动观测仪器和观测方法的发展。

中国气象局大气探测试验基地（简称试验基地）承担着气象观测专用技术装备的测试评估、成果中试、重大和关键技术的研发、系统集成以及新型气象装备原理样机向工程样机转化研发试验等工作。为推进观测技术发展、做好业务技术支撑、保证装备质量，多年来中国气象局气象探测中心在北京南郊试验基地(2015年批准为中国气象局气象探测成果转化中试基地)开展了云、能、天等地面新型设备的测试评估工作，以提升地面观测自动化水平；开展了云雷达、超声风、微波辐射计等新型垂直观测试验，为观测设备改进和选型提供了参考依据；针对观测业务中存在的问题，开展了称重和翻斗降水传感器的对比试验、不同防辐射罩对温度观测的影响试验、不同观测技术的湿度传感器试验等，为建立业务规范、改进技术性能、开展观测数据质量研究和评估提供了技术支持，同时这些试验也可为科研立项、成果转化提供依据和参考。其中有些观测试验报告已提交到CIMO，在相关网站上发布。

试验基地本着“开放共享 协同创新”的原则，将向科研院所、院校、企业开放共享相关资源、提供试验测试平台，共同推进气象观测技术的发展。同时在申请CIMO的测试基地和牵头中心，积极为WMO观测仪器和方法贡献中国方面的力量！

本报告针对2014—2015年度在北京南郊试验基地开展的地面自动观测设备、行业专项成果试验、观测业务设备比对等系列试验进行分析总结，为地面观测技术发展和业务改进提供科学参考，今后还将根据业务需求扩大，在不同的试验基地开展雷达、基地遥感、专业气象等其他领域的观测试验，为综合观测技术发展做好支撑。

A handwritten signature in black ink, reading '郑明超' (Zheng Mengchao).

2015年12月26日

中国气象局大气探测试验基地掠影





目 录

1 地基主动式云自动观测设备外场试验	1
1.1 背景和目的	1
1.2 参试设备及工作原理	1
1.3 试验对比分析内容	3
1.4 地基观测数据与卫星资料融合试验	56
1.5 试验结论	60
2 超声波测风传感器试验	61
2.1 背景和目的	61
2.2 传感器及工作原理	62
2.3 试验内容与分析	65
2.4 试验结论	80
3 利用近地面温湿度观测综合判别露、霜试验	81
3.1 背景和目的	81
3.2 近地面观测系统设计	82
3.3 试验内容与分析	84
3.4 露霜判别指标的确定	89
3.5 试验结论	91
4 地面凝结现象仪试验	92
4.1 背景和目的	92
4.2 设备及工作原理	92
4.3 数据来源	94
4.4 数据分析	95
4.5 试验结论	97
5 相对湿度自动与人工观测比对分析	98
5.1 背景和目的	98
5.2 数据预处理	100
5.3 相对湿度比对分析	104
5.4 气温低于零度以下时的资料比对分析	113
5.5 主要结论	118
5.6 问题和建议	119

目 录

- 6 不同湿度传感器对比试验 120
 - 6.1 背景和目的..... 120
 - 6.2 数据质量分析..... 123
 - 6.3 数据分析..... 125
 - 6.4 试验结论与讨论..... 129
- 7 防辐射罩与百叶箱对温度测量影响试验 ... 131
 - 7.1 背景和目的..... 131
 - 7.2 试验准备..... 131
 - 7.3 试验内容及数据分析..... 132
 - 7.4 试验结论与讨论..... 143

1 地基主动式云自动观测设备外场试验*

摘 要：本试验主要目的是为了分析评估设备性能、确定地面云观测技术体制。报告利用2015年1—5月份在中国气象局大气探测试验基地（北京南郊试验基地）的多种地基主动式云自动观测设备进行对比分析，同时利用地基红外测云仪、可见光成像仪、探空气球、天气现象仪等多种观测设备进行辅助分析。分析结果表明：毫米波测云仪在探测云的完整性（云底高、云顶高、云体结构、云微物理）、准确性、对天气的适应性、可靠性、业务运行成本以及与卫星数据融合的可行性等方面应用潜力远高于激光云高仪。

1.1 背景和目的

多年来在中国气象局的推动下，我国在云自动观测领域做出了很多创新性工作。全球现有的云观测设备我国基本都已研制出来，为我国地面观测自动化提供了丰富的技术资源。目前主要的任务是选择出满足需求，适合业务运行的设备。多年的试验、分析已经证明主动遥感式云自动化观测设备有明显优势，因此本报告针对主动遥感云自动化观测设备进行对比分析。

通过综合对比试验，从探测云的完整性（云底高、云顶高、云体结构、云微物理）、准确性、对天气的适应性、可靠性、业务运行成本以及与卫星数据融合的可行性等方面进行分析，以遴选出更适合业务应用的云自动观测设备。

1.2 参试设备及工作原理

1.2.1 参试设备

从2014年至今，中国气象局气象探测中心组织对两种型号激光云高仪及8毫米波测云仪进行观测对比试验研究，参试设备信息如表1.2-1，设备实物照片如图1.2-1，安装位置如图1.2-2。

表1.2-1 地基主动式云自动观测设备

设备名称	工作原理	本报告分析时间
CYY-2B激光云高仪	利用激光测距原理计算云高	2015年1月~2015年5月
HY-CL51激光云高仪	利用激光测距原理计算云高	2015年1月~2015年5月
8毫米波测云仪	通过后向反射率计算云高、云厚等	2015年1月~2015年5月

*本报告执笔人：胡树贞，刘聪，马舒庆，陶法，张雪芬，唐英杰



8毫米波测云仪



激光云高仪

图1.2-1 地基主动式云自动观测设备实物图

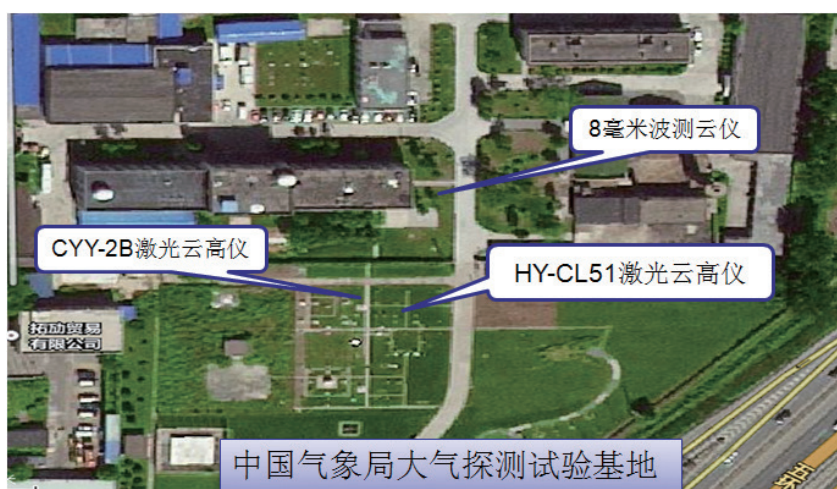


图1.2-2 地基主动式云自动观测设备安装位置图

1.2.2 辅助设备

同时还有多种辅助设备参与试验，辅助设备信息如表1.2-2。

表1.2-2 辅助设备

设备名称	探测内容	参试时间
前向散射能见度仪	水平能见度	2015年1月~5月
新型自动气象站	地面常规要素	2015年1月~5月
降水天气现象仪	降水类型	2015年1月~5月
气球探空系统	大气垂直温度、湿度	2015年1月~5月
全天空可见光成像仪	可见光波段全天空图像	2015年1月~5月
全天空近红外成像仪	8-14 μ m波段全天空图像	2015年1月~4月

1.3 试验对比分析内容

试验从2014年开始至今。本报告对2015年1月~5月的试验数据进行分析。

1.3.1 各设备探测云完整性对比分析

（1）激光云高仪主要参数指标

激光云高仪是利用激光技术测量云底高度的一种主动式大气遥感设备，分为垂直探测和扫描探测两种探测方式。探测原理是:激光器对天空发射脉冲光束，接收来自云底（或天空）对激光产生的后向散射。根据从发射激光脉冲到接收到回波信号的时间和激光束的仰角，算出云底高度，根据云底高的分布算出积分云量。激光云高仪主要参数指标及观测产品如表1.3-1。

表1.3-1 激光云高仪主要参数指标

序号	名称	主要参数指标
1	发射信号	激光脉冲信号
2	探测对象	云、气溶胶
3	探测要素	云高、云量
4	工作频率	910±10nm
5	距离量程	≥15km
6	平均发射功率	HY-CL51: 19.5W CYY-2B:37W
7	脉冲参数	脉冲宽度: 30~100ns 重复频率: 10kHz或5kHz
8	探测方式	垂直观测
9	距离分辨率	≤5m
	时间	15s~60s可调
10	气象产品	云高、云量、回波强度、消光系数、边界层高度、垂直能见度等
11	功耗	HY-CL51系统总功耗≤300W CYY-2B系统总功耗≤700W

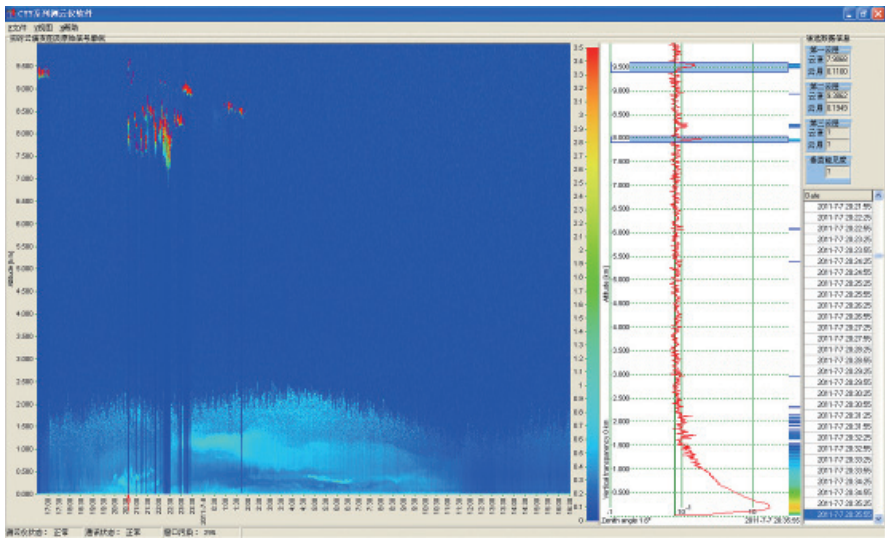


图1.3-1 激光云高仪观测产品



(2) 毫米波测云仪主要参数指标

毫米波测云仪主要以不同毫米波波段为发射源, 间歇性地向空中发射电磁波(脉冲), 然后接收云目标散射回来的电磁波(回波), 利用回波信息反演计算得到云信息。毫米波测云仪属于全相参体制, 采用全固态发射机和脉冲压缩信号处理技术。全固态发射机采用高占空比工作模式, 充分利用发射平均功率, 保证探测距离; 采用宽、窄脉冲相结合的脉冲压缩技术, 解决距离分辨率、近距离盲区等问题, 提高脉冲压缩信号主副瓣比及组合信号的退模糊算法。毫米波测云仪主要参数指标如表1.3-2。

表1.3-2 8毫米波测云仪主要参数指标

序号	名称	主要参数指标
1	体制	全固态全相参准连续波
2	探测对象	云高、云量、降水等
3	探测要素	云高、云量
4	天线	口径尺寸: $D \approx 2.4\text{m}$, 波束宽度: 0.25°
5	工作频率	毫米波 $35\text{GHz} \pm 200\text{MHz}$, $\lambda \approx 8.6\text{mm}$
6	距离量程	$\geq 15\text{km}$
7	发射功率	$P_t > 10\text{W}$
8	脉冲参数	发射时宽: $20\mu\text{s}/0.2\mu\text{s}$ PRF: $10 \sim 20\text{KHz}$
9	天线扫描方式	垂直顶空瞄准式工作
10	测速范围	15m/s
11	探测精度	回波强度 $\leq 1\text{dB}$, 垂直速度 $\leq 0.2\text{m/s}$, 速度谱宽 $\leq 1\text{m/s}$
12	距离分辨率	$\leq 30\text{m}$
	时间	$1\text{s} \sim 60\text{s}$ 可调
13	气象产品	回波反射率、垂直速度、功率谱宽、速度谱宽、液态水含量等; 云和降水滴谱分布、云水/雨水含量等
14	功耗	雷达系统总功耗 $\leq 300\text{W}$

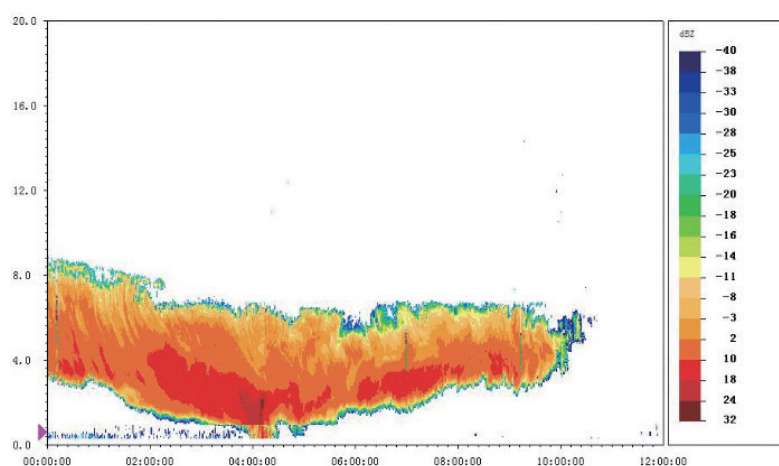


图1.3-2 毫米波测云仪反射率产品

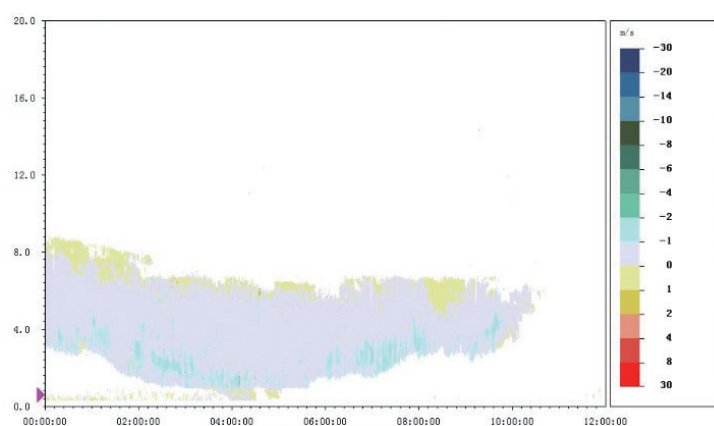


图1.3-3 毫米波测云仪速度谱产品

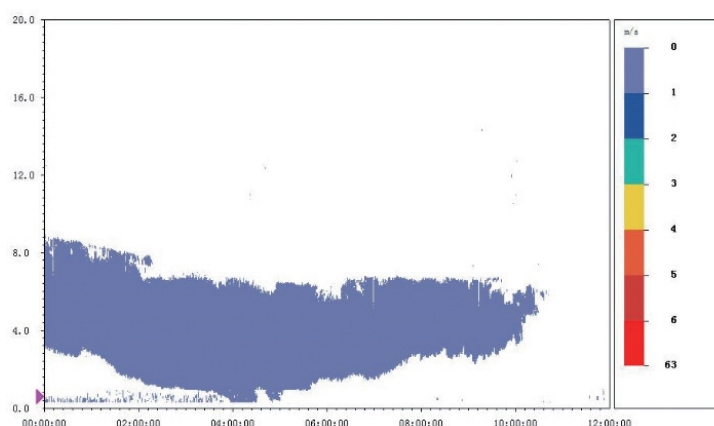


图1.3-4 毫米波测云仪谱宽产品

(3) 小结

由于毫米波测云仪采用毫米波（35GHz），在此波段下相比与910nm的激光云高仪具有如下优势：

①毫米波测云仪的波长较长，具有较强的探测云、雾的能力，能够穿透较厚云层，并且获取云顶高及云厚等信息。

②具有较好的多普勒速度分辨力，且测速精度较高。除了能够连续观测云厚、云底高、云顶高、云量等宏观参数外，还可以获得云内微物理参量，如云粒子的速度谱、反射率、冰与液态水含量等。

1.3.2 各设备探测准确性对比分析

(1) 利用探空资料分析云垂直结构方法

近年来随着我国L波段高空气象探测系统的建立和发展，有学者利用探空资料对云垂直结构特征进行研究，探空气球在上升过程中，在入云和出云时刻相对湿度会发生明显变化，Wang等提出用相对湿度的阈值以及云顶和云底相对湿度负和正的跳跃变化来判断云层（WR95



法)；Minnis et al (2005) 利用探空资料，通过对不同的温度值设定不同的相对湿度阈值判断云层，以此判断云垂直结构(MN05法)；张玲等(2009)通过分析相对湿度的突然增加和减小来订正地面人工观测云的准确性；周毓荃和欧建军(2010)采用WR95法，利用我国探空秒数据，计算分析了不同云垂直结构，将得到的分析结果同Cloudsat卫星实测云垂直结构进行多个例的对比分析，验证了相对湿度阈值判断云垂直结构方法的可行性，及利用我国业务探空资料分析云垂直结构的可用性。

利用探空资料分析云垂直结构目前主要有3种方法：温度露点差值法、相对湿度阈值法、温度和相对湿度廓线随高度变化的二阶导数法。周毓荃等对这3种方法进行了比较，认为直接用相对湿度作为阈值来判断是否为云比较合理，需考虑3个方面：(1)不同温度下相对湿度的合理计算，当气温低于0℃时，要按照冰面饱和水汽压计算相对湿度，即利用实际水汽压除以冰面的饱和水汽压得到新的相对湿度；(2)云层中相对湿度最大值要大于87%，最小值不小于84%；(3)相对湿度在云顶有负的跳变，在云底有正的跳变。

本报告利用周毓荃等人提出的云阈值判别方法，根据探空廓线温湿度数据及走势情况，结合当时云量、天气现象、能见度、云类等信息进行综合分析，找到对应的入云点及出云点所对应的云高。在按照冰面饱和水汽压计算高空相对湿度时，会有相对湿度大于100%现象，在本报告中此类数据全部按100%处理。图1.3-5为2015年1月3日7:15分探空气球温湿廓线数据，当时器测能见度为2126m；人工观测的天气现象为霾，云类为卷云、高积云，人工观测云量为10-。结合近红外全天空图像和可见光波段全天空图像等信息，确定此时刻天顶存在两层云，第一层为2684m~3852m，第二层为6952m~7478m。

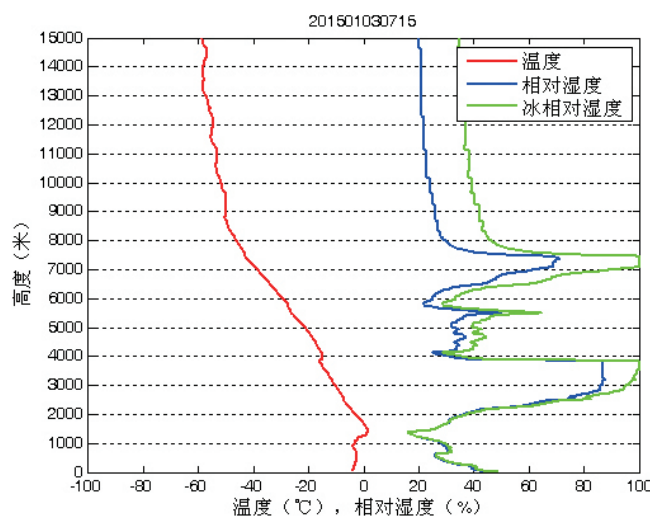


图1.3-5 探空温度、相对湿度廓线

（2）地基测云仪与探空资料对比分析

毫米波测云仪、激光云高仪、探空气球施放点的位置如图1.3-6所示，其中2台激光云高仪位置较近，未单独列出，各设备位置相距最大不超过200m。

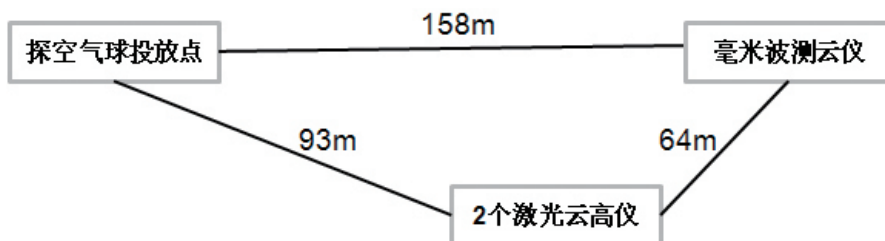


图1.3-6 毫米波测云仪、激光云高仪、探空气球施放点位置

1) 资料获取情况统计

本报告所使用的探空观测资料为北京市观象台2015年1月1日至5月31日的探空数据，探空资料时间分辨率为每日2次，分别为7:15分和19:15分。对于一次放球出现多层云情况，每层云当成独立样本进行处理，对照放球时刻全天空可见光和近红外图片对探空云体识别进行质量控制以确保天顶有云，在探空廓线数据、全天空可见光图片、全天空近红外图片3种数据联合质量控制下，共筛选出102个探空有效样本。

由于对比试验期间各设备有数据缺测情况（CYY-2B激光云高仪缺测8次，HY-CL51激光云高仪缺测1次，毫米波测云仪缺测9次），另外不同测云设备对多层云探测能力不同，因此不同设备对应的探空样本数不同，表1.3-3至表1.3-5为对比分析时间段内3种测云设备和探空云高数据获取的对比情况，考虑到探空识别的云体与地基遥感设备探测地理位置不同，表中按照放球时刻人工观测云量进行分类统计。

表1.3-3 对比试验期间各设备数据获取情况（人工云量3～10成）

观测设备	观测设备样本数	探空时人工观测样本数	获取率
CYY-2B激光云高仪	49	94	52.1%
HY-CL51激光云高仪	75	101	74.3%
毫米波测云仪	84	93	90.3%

表1.3-4 对比试验期间各设备数据获取情况（人工云量8～10成）

观测设备	观测设备样本数	探空时人工观测样本数	获取率
CYY-2B激光云高仪	45	86	52.3%
HY-CL51激光云高仪	68	93	73.1%
毫米波测云仪	78	85	91.8%



表1.3-5 对比试验期间各设备数据获取情况（人工云量10成）

观测设备	观测设备样本数	探空时人工观测样本数	获取率
CYY-2B激光云高仪	42	83	50.6%
HY-CL51激光云高仪	65	90	72.2%
毫米波测云仪	77	83	92.8%

从表1.3-3至表1.3-5的统计中发现，随着放球时刻人工观测云量的增多，各测云设备数据获取率并没有明显变化趋势。原因是云量小于8成的样本数不足10个，另外在人工挑选探空云高样本时，查找的是云层较明显且有一定厚度的样本。通过与探空数据对比分析，发现毫米波测云仪的数据获取率达90%以上，远高于其它2个激光云高仪。

低能见度时刻一般都伴随有雾霾天气现象，为了检验三种测云设备对雾霾天气的适应性，本报告按照放球时刻器测能见度大小进行分段统计，对各地基遥感测云设备的数据获取率进行分析，数据见表1.3-6至表1.3-8。

表1.3-6 对比试验期间各设备数据获取情况（能见度<3000m）

观测设备	观测设备样本数	探空时人工观测样本数	获取率
CYY-2B激光云高仪	5	13	38.5%
HY-CL51激光云高仪	8	18	44.4%
毫米波测云仪	14	14	100%

表1.3-7 对比试验期间各设备数据获取情况（3000<能见度<8000m）

观测设备	观测设备样本数	探空时人工观测样本数	获取率
CYY-2B激光云高仪	17	41	41.5%
HY-CL51激光云高仪	33	43	76.7%
毫米波测云仪	36	41	87.8%

表1.3-8 对比试验期间各设备数据获取情况（能见度>8000m）

观测设备	观测设备样本数	探空时人工观测样本数	获取率
CYY-2B激光云高仪	27	40	67.5%
HY-CL51激光云高仪	34	40	85.0%
毫米波测云仪	34	38	89.5%

从表1.3-6、1.3-7、1.3-8中发现毫米波测云仪在不同能见度阶段数据获取率均明显高于其它2个激光云高仪，且云底高探测能力不受能见度高低影响；另外，激光云高仪在低能见度条件下数据获取能力明显降低，随着能见度的升高激光云高仪数据获取能力增强。

2) 测云设备与探空准确性分析

① CYY-2B激光云高仪与探空对比

CYY-2B激光云高仪去除数据缺失样本外（缺失8次），与探空共有49个对应样本，二者之间云高走势如图1.3-7所示。

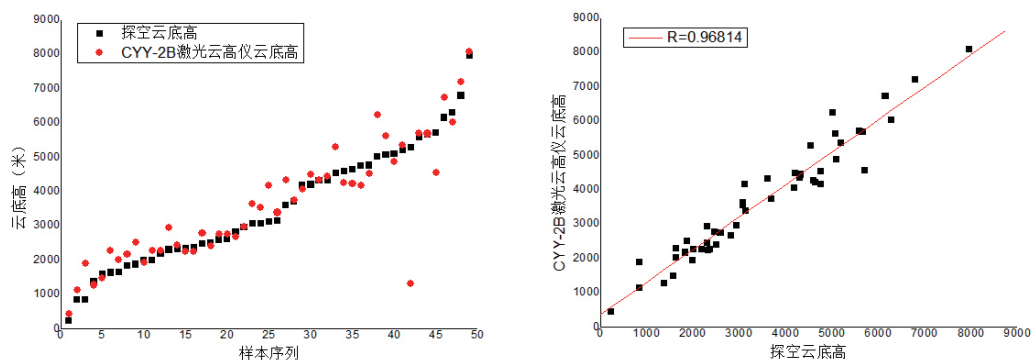


图1.3-7 CYY-2B激光云高仪与探空测云高对比

其中3月18日7:15探空仪所测云高为5275m，CYY-2B激光云高仪测得云底高为1308m，此时天气状况：能见度13056m，卷云，云量10-。图1.3-8为当天探空所测温湿廓线和可见光全天空云图，从温湿度廓线图中看出在1305m高度处，相对湿度最大达到77%，且有突变特征，因不满足之前的云体判别条件，没有给出云层信息。另外，从可见光全天空图像中没有看到明显的低云信息，并且HY-CL51激光云高仪、毫米波测云仪均没有测到附近云层信息，因此断定CYY-2B激光云高仪误判。

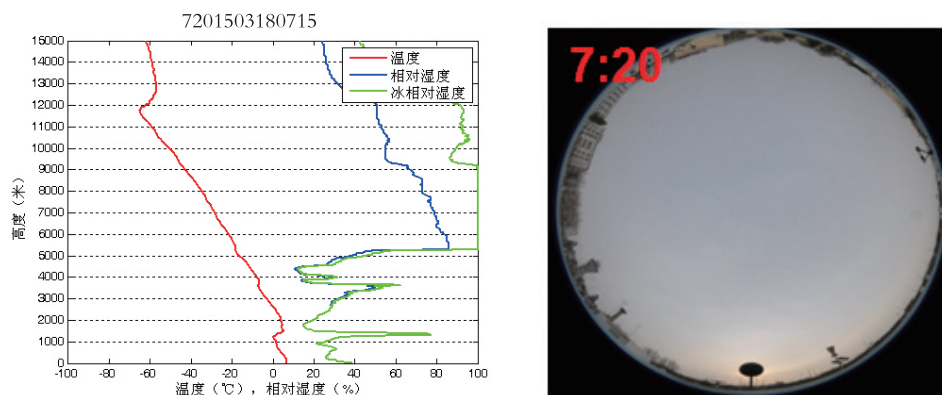


图1.3-8 3月18日7:15探空温湿廓线、可见光全天空云图

排除上述样本后，在48个对应样本中，CYY-2B激光云高仪所有样本平均云底高比探空数据高179.6m，探空云高在1000m以上样本的平均相对误差为6.0%（云底高1000m以下有3个样本，云底高越低二者云高若差一点，换算成相对误差较大，为使数据更客观，故排除），二者之间相关性 $R=0.968$ ，具有很好的相关性。



②HY-CL51激光云高仪与探空对比

HY-CL51激光云高仪去除数据缺测样本外（缺测1次），与探空共有75个对应样本，二者之间云高走势如图1.3-9所示。

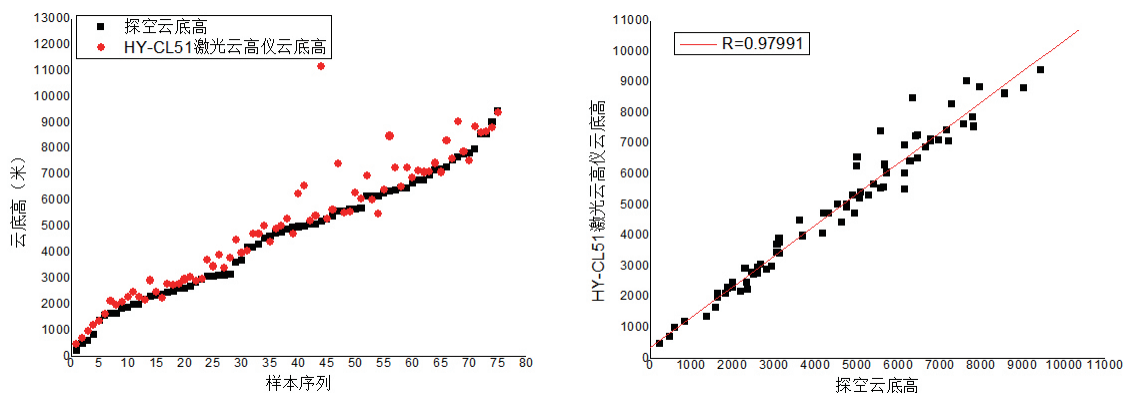


图1.3-9 HY-CL51激光云高仪与探空测云高对比

从图1.3-9中可以看出，HY-CL51激光云高仪在4000m以下的中低云与探空数据非常接近，在云底高于5000m时，HY-CL51激光云高仪所测数据一般高于探空所测云底高。排除1个差距最大的样本后，在74个对应样本中，HY-CL51激光云高仪平均云底高比探空数据高346.8m，云底高在1000m以上样本的平均相对误差为8.7%（云底高1000m以下有4个样本），二者相关性 $R=0.979$ ，具有很好的相关性。

对云底高相差较大的样本进行逐个分析，样本中数据差距较大样本点的信息见表1.3-9。

表1.3-9 探空与HY-CL51激光云高仪云底高相差较大样本信息

样本时间	探空云底高	HY-CL51云底高	误差（m）	相对误差	能见度（m）	天气状况
201501050716	3065	4340	1275	41.6%	2891	卷云、高积云10-，霾
201504060715	4987	6270	1283	25.7%	33494	卷云10-
201504230715	7662	9030	1368	17.8%	6576	高积云、卷云10-，霾
201503220715	5009	6570	1561	31.1%	26623	高积云10-
201503120715	5572	7400	1828	32.8%	5871	卷云4
201502061915	6343	8480	2137	33.6%	3238	卷云、高积云10-
201505141916	5200	11160	5960	114.6%	13436	卷云、积云7

5月14日19:16样本能见度13436m，卷云、积云7成，HY-CL51激光云高仪所测云底高11160m，探空云底高5200m，从HY-CL51激光云高仪数据中查找在18:47-19:21时刻内出现此数据，云高观测时间较短，从此时刻探空温湿廓线中可断定此时刻HY-CL51激光云高仪误判。

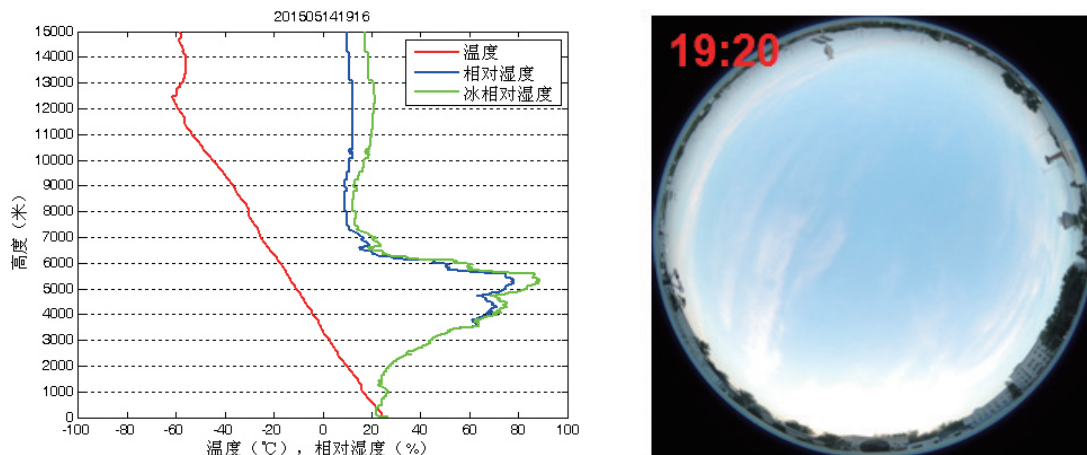


图1.3-10 5月14日19:16探空温湿廓线及全天空云图

2月6日19:15的样本能见度3238m，卷云、高积云10-成，HY-CL51激光云高仪所测云高8480m，探空云底高6343m，从HY-CL51激光云高仪数据中查找此时刻内连续出现此数据，从此时刻探空温湿廓线中可断定HY-CL51激光云高仪误判。

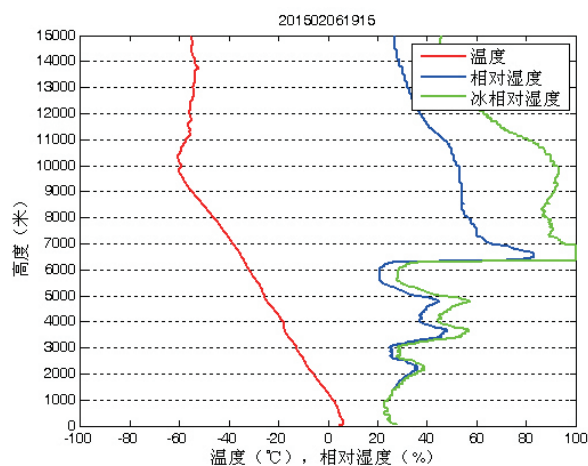


图1.3-11 2月6日19:15探空温湿廓线

3月12日7:15样本能见度5871m，卷云4成，HY-CL51激光云高仪所测云底高7400m，探空云底高5572m，从HY-CL51激光云高仪文本数据中查找在7:30-8:50时刻内出现此数据，且在后期探测云底高6850m。从此时刻探空温湿廓线中可看出在4419-4965m、5572-9631m处有云层存在，由于天空人工观测卷云4成，此时刻难以断定HY-CL51激光云高仪数据的准确性。

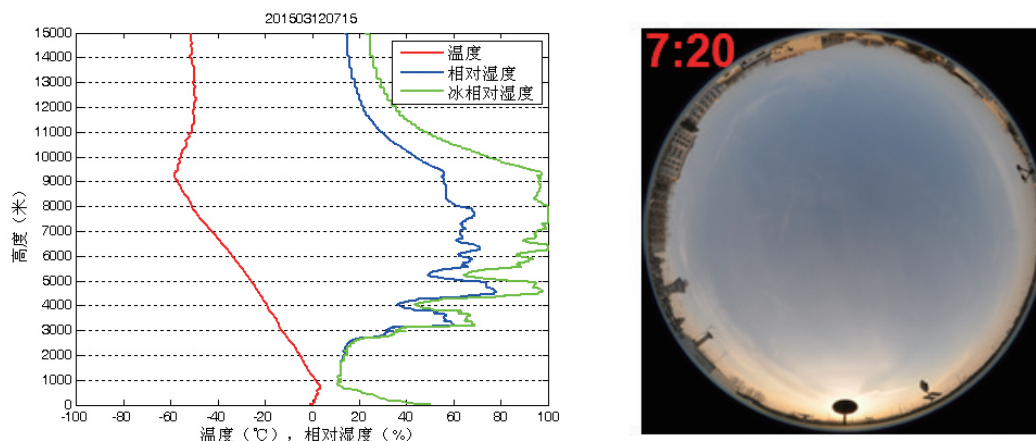


图1.3-12 3月12日7:15探空温湿廓线及全天空云图

3月22日7:15样本能见度26623m，高积云10-成，HY-CL51激光云高仪所测云底高6570m，探空云底高5009m，从HY-CL51激光云高仪数据中查找在6:13-8:32时刻内出现高度6500m左右云底高数据，在8:08-12:07又分出现5000m左右云底高数据，从此时刻探空温湿廓线中明确显示云底位于5000m左右，本样本为云层没有对应好所导致的误差。

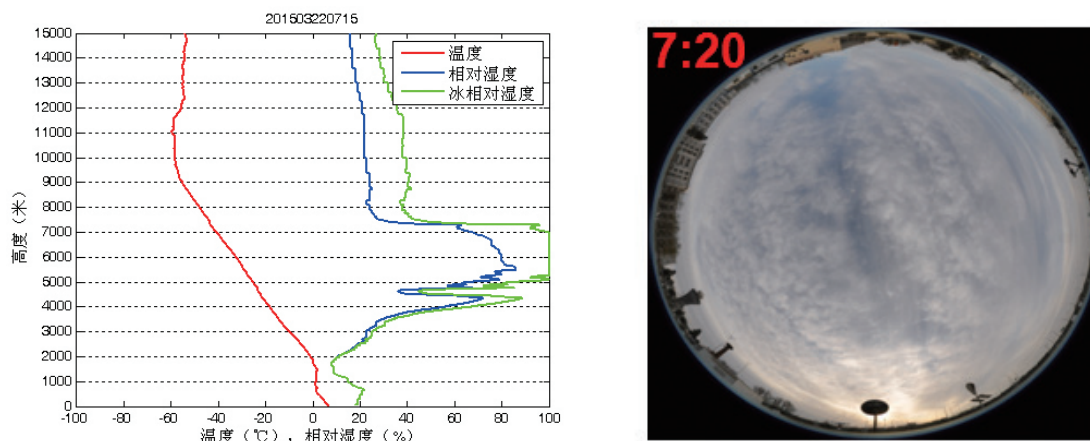


图1.3-13 3月22日7:15探空温湿廓线及全天空云图

4月23日7:15样本能见度6576m，高积云、卷云10-，霾，HY-CL51激光云高仪所测云底高9030m，探空云底高7662m，从HY-CL51激光云高仪数据中查找在7:30-8:20时刻有云底高数据，且在后期云底高降为8350m，从此时刻探空温湿廓线中看到湿度在7000-8000m为缓慢变化，且最大值没有达到100%，云底难以明确分辨，不能断定HY-CL51激光云高仪云底高探测错误。

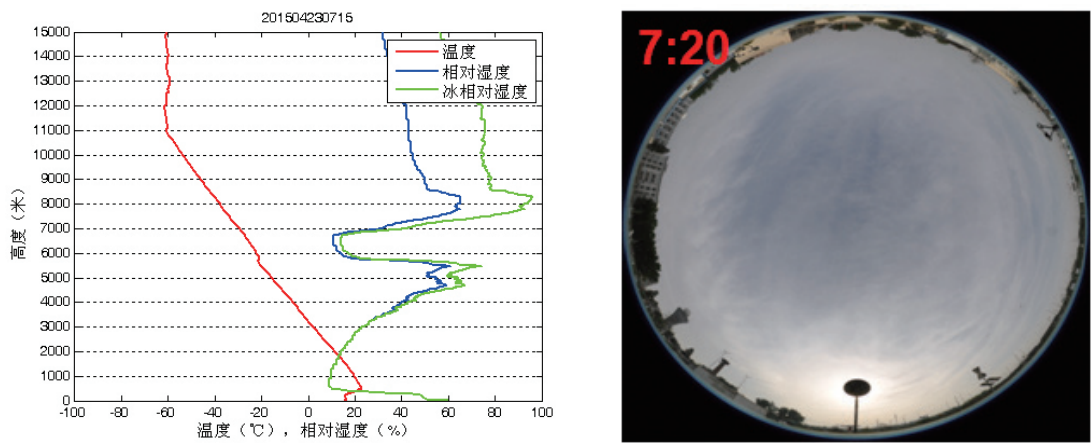


图1.3-14 4月23日7:15探空温湿廓线及全天空云图

4月6日7:15样本能见度33494m，卷云10-成，HY-CL51激光云高仪所测云底高6270m，探空云底高4898m，从HY-CL51激光云高仪数据中查找在6:00-9:00时刻有5500m和6200m云底高数据交替出现，从此时刻探空温湿廓线中看到湿度在5000m时骤然增大，在6500m附近虽然没有达到之前规定的云判别相对湿度阈值，但有较剧烈上升趋势，由于探空气球与地基测云仪位置可能不同，因此不能断定HY-CL51激光云高仪云底高探测错误。

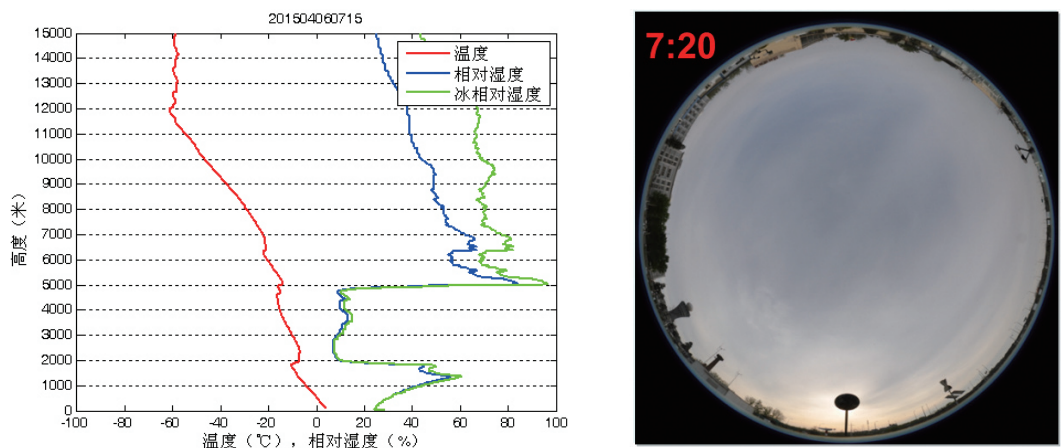


图1.3-15 4月6日7:15探空温湿廓线及全天空云图

通过对上述误差大的样本进行分析，HY-CL51激光云高仪在探测具有一定厚度的中低云时准确性较高。

③毫米波测云仪与探空对比

毫米波测云仪去除数据缺测样本（9个样本缺测）和降水样本（3个样本观测时刻发生降水），与探空共有81个对应的云底样本。在云顶高探测方面，由于探空云顶高在有的样本中不



能明确判定（湿度滞后效应明显或湿度传感器存在问题），毫米波测云仪云顶高与探空云顶数据共有72组对应样本。毫米波测云仪与探空识别云底高走势如图1.3-16所示。

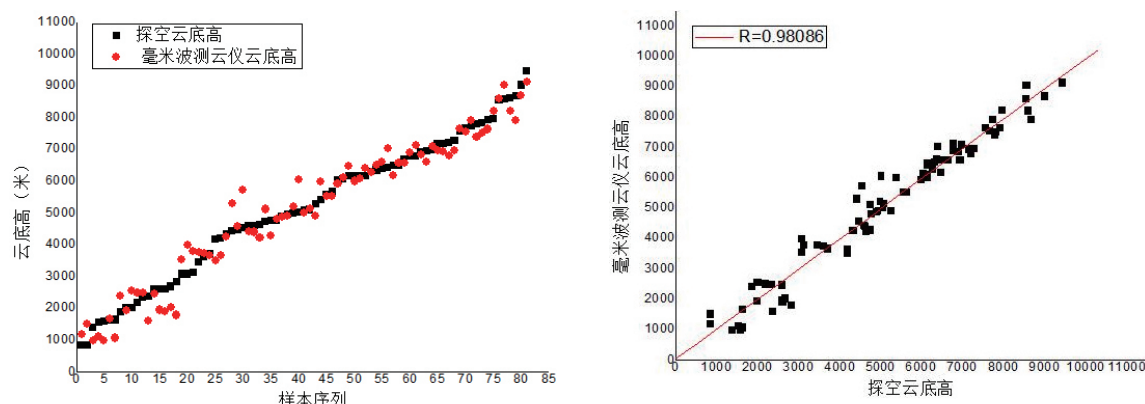


图1.3-16 毫米波测云仪与探空测云底高对比

从图1.3-16中得知，在云底高对应的81个样本序列中，没有偏差较大的样本出现，毫米波测云仪平均云底高仅比探空数据低22.2m，云高在1000m以上样本的平均相对误差只有-1.6%（低于1000m有3个样本），二者之间云底高相关性 $R=0.981$ ，相比于前面两种激光云高仪具有更高的准确性。

由于毫米波测云仪独有的探测性能，可以穿透较厚的云层，具有探测云顶高度及多层云的能力。图1.3-17为探空云顶高与毫米波测云仪所测云顶高72个样本序列走势图，样本中数据差距较大点信息见表1.3-10。从图1.3-17中看到，在探空测得的低云样本中，毫米波测云仪有的探测到高云，在探空测得的云顶高大于10000m样本中，毫米波云顶高有的探测数据偏小（具体分析见下文），其余大部分样本二者走势一致。下文将对二者云顶高偏差较大的样本序列进行特例分析。

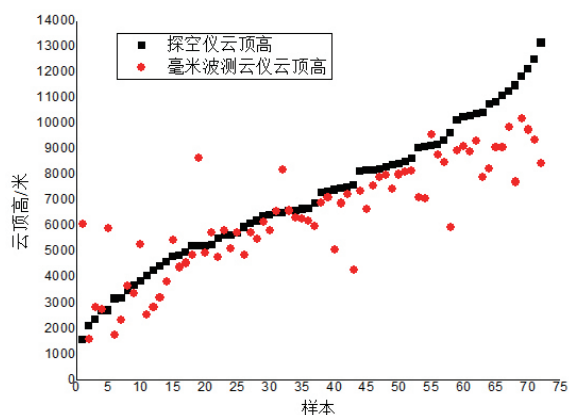
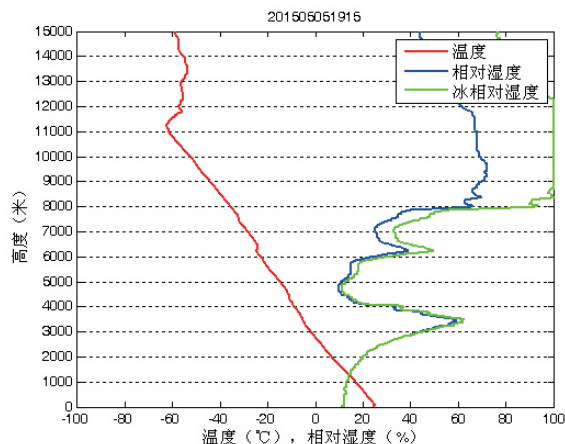


图1.3-17 毫米波测云仪与探空测云顶高对比

表1.3-10 云顶高样本误差较大样本信息

样本时间	探空云顶高	毫米波云顶高	误差 (m)	相对误差	能见度	天气状况
201505051915	13143	8448	-4695	-35.7%	19184	卷云10-
201501260715	11480	7719	-3761	-32.8%	602	卷云5, 雾
201503120715	9631	5940	-3691	-38.3%	5871	卷云4
201505120715	7578	4311	-3267	-43.1%	20718	层积云9
201501240715	12486	9363	-3123	-25.0%	3003	卷云10-, 霾
201503080715	10766	8250	-2516	-23.4%	19171	卷云10-, 雾
201502010715	10413	7902	-2511	-24.1%	4151	卷云10-, 霾
201503180716	12119	9756	-2363	-19.5%	13056	卷云10-
201501201915	7410	5070	-2340	-31.6%	3505	卷云10-, 霾
201505090715	11081	9057	-2024	-18.3%	11727	层积云10
201501121915	9081	7065	-2016	-22.2%	6942	卷云10-, 霾
201501030716	3852	5292	1440	37.4%	2126	卷云、高积云10, 霾
201503291915	6522	8201	1679	25.7%	7274	卷云10-
201501050716	2711	5916	3205	118.2%	2891	卷云、高积云10-, 霾
201504060715	5241	8658	3417	65.2%	33494	卷云10-
201501140715	1575	6066	4491	285.1%	2781	层积云10, 霾

5月5日19:15样本能见度19184m, 卷云10-, 毫米波测云仪所测云顶高8448m, 探空云顶高13143m, 在温湿廓线中8000m以上高空相对湿度达到100%, 从毫米波测云仪反射率图中看出在19:00时刻天空存有卷云, 但毫米波测云仪云厚探测数据明显比探空偏小。从对应时刻可见光图片中看到天空有较薄卷云存在, 但厚度远没有达到4000m, 因此断定探空湿度传感器存在问题。从可见光图片中初步得出毫米波测云仪探测数据可信。



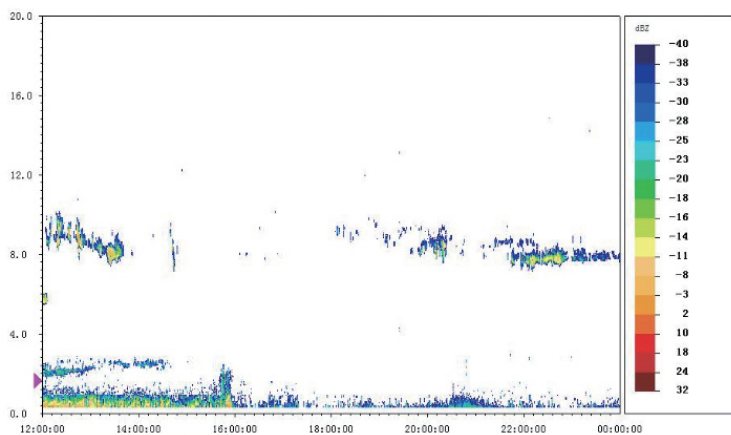


图1.3-18 5月5日19:15探空温湿廓线及毫米波测云仪反射率

1月26日7:15样本能见度602m, 卷云5成, 雾, 毫米波测云仪所测云顶高7719m, 探空云顶高11480m。在探空的温湿廓线中, 在4000-6000m区间偶有满足相对湿度阈值点出现, 由于厚度较小, 予以忽略; 在6500m-11000m区间相对湿度大于100%, 而从毫米波测云仪反射率图中看出在6:00时刻天空开始出现高层卷云, 反射率强度较弱, 但在8:00之后天顶云层加厚, 云顶高平均达到7830m。由于能见度较低, 在可见光图片中云纹理不明显, 但从近红外云图发现天顶位置云辐射较弱, 在10000m以上高空温度传感器指示温度有所回升, 此时探空仪相对湿度才缓慢下降, 因此断定探空湿度传感器在遇到6000m以上云时存在问题, 初步断定毫米波测云仪探测数据正确。

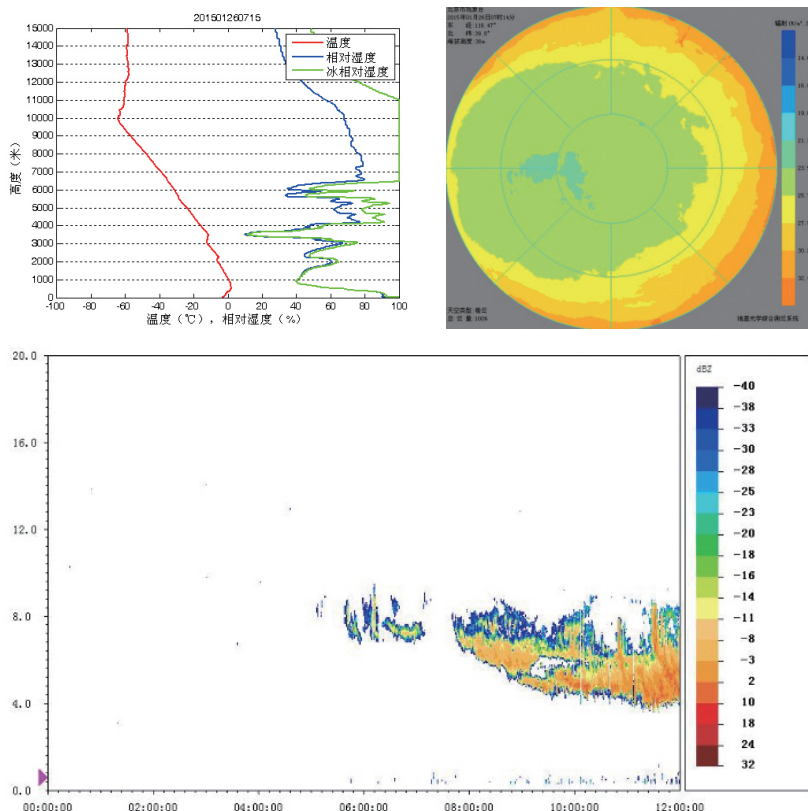


图1.3-19 1月26日7:15探空温湿廓线、近红外全天空图像、毫米波测云仪反射率

3月12日7:15样本能见度5871m，卷云4成，毫米波测云仪所测云顶高5940m，探空云顶高9631m。在探空温湿廓线中，在4500-5000m区间有1层云，在5572m-9631m区间相对湿度满足阈值条件，但从对应时刻可见光图片中看出天顶云厚远没有达到4000m的程度，因此判断毫米波数据可信。

从毫米波测云仪反射率图中看出在7:00时刻天空开始出现高层云，反射率强度较弱，但在9:00之后天顶云层加厚，毫米波云顶高达8000m，与可见光图片较吻合。

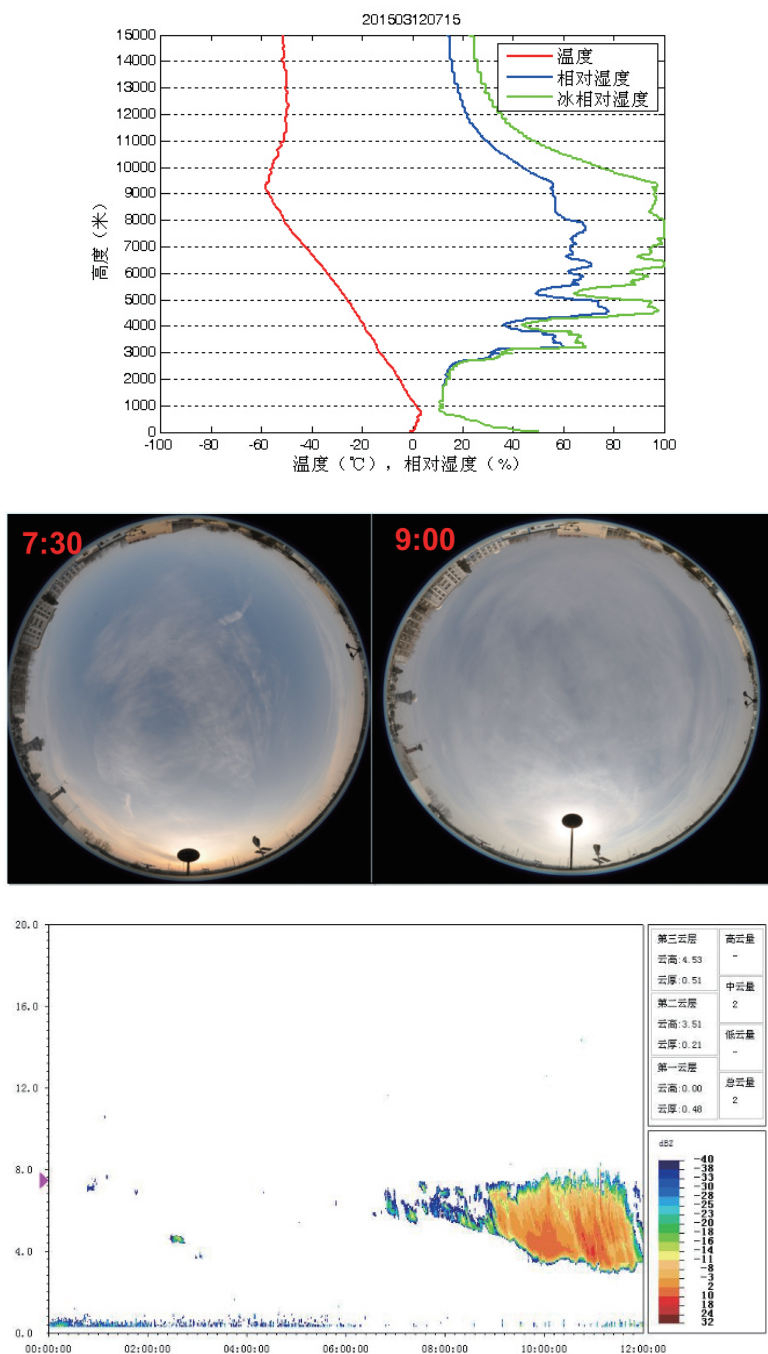


图1.3-20 3月12日7:15探空温湿廓线、可见光图片、毫米波测云仪反射率



5月12日7:15样本能见度20718m，层积云9成，毫米波测云仪所测云顶高4311m，探空云顶高7578m。在探空温湿廓线中，在3076-5762m区间有第一层云；在5897m-7578m区间相对湿度满足阈值条件，为第二层云。由于两层云之间间隔很小，在数据处理时当成了一层云处理，云厚为3076-7578m。而从毫米波测云仪反射率图中看出在7:30时刻天空出现两层云，云底高分别为3990m和5990m，其中第二层云的云厚为1185m，得到云顶高度为7175m，与探空云顶高7578m一致。

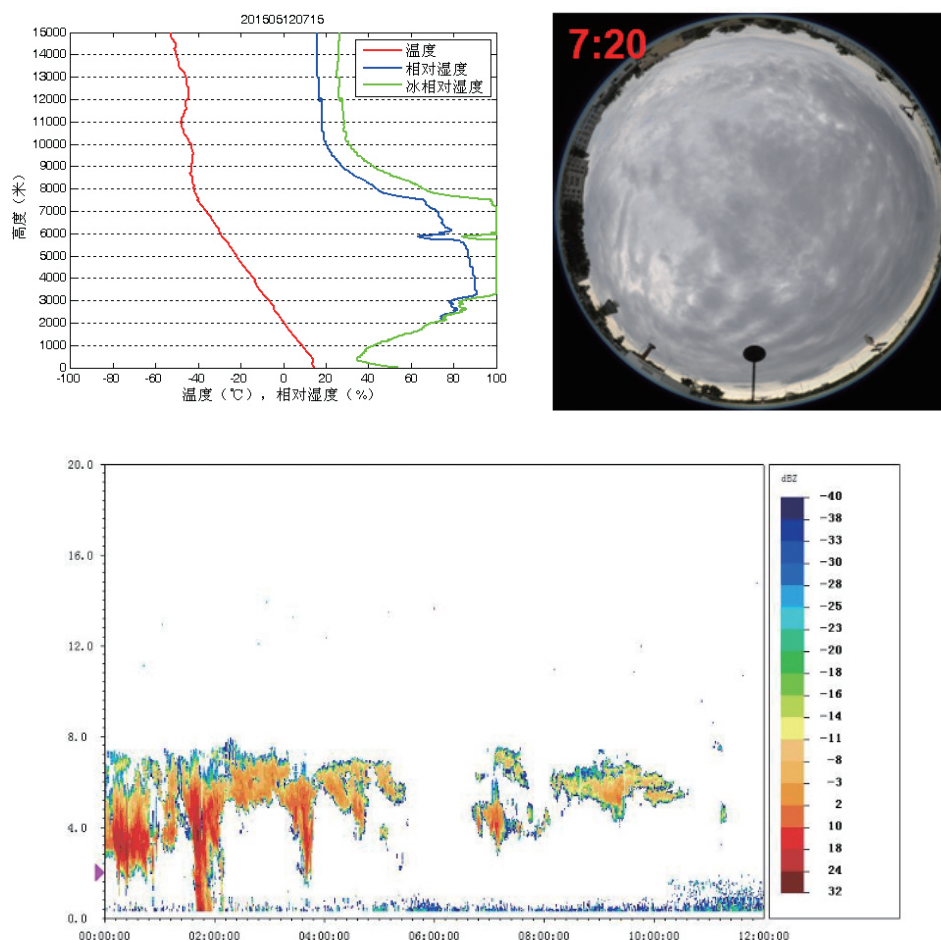


图1.3-21 5月12日7:15探空温湿廓线、可见光图片、毫米波测云仪反射率

1月20日19:15样本能见度3505m，卷云10-成，霾，毫米波测云仪所测云顶高5070m，在温湿廓线中，在4893-7410m区间有1层云，在云区间5400m左右时刻，相对湿度87%，已满足了云判别阈值，但由于探空仪湿度滞后效应，无法确定探空出云高度，因此不能断定毫米波测云仪探测错误。

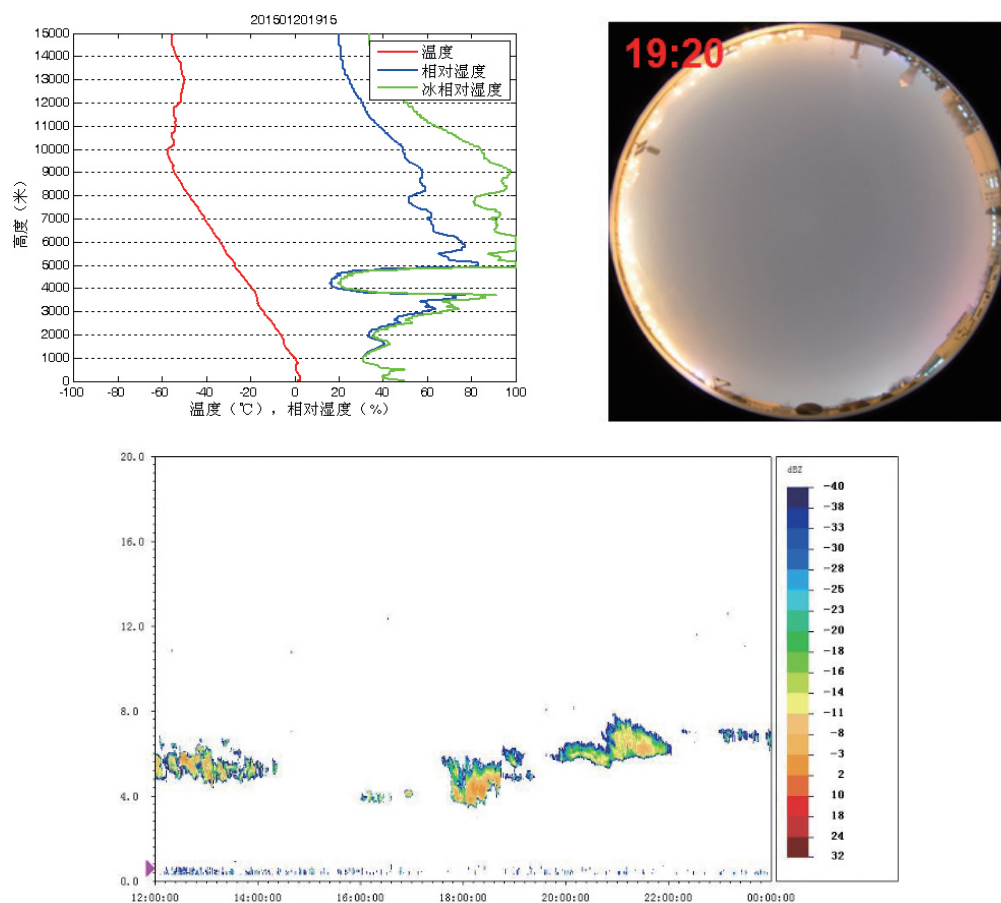
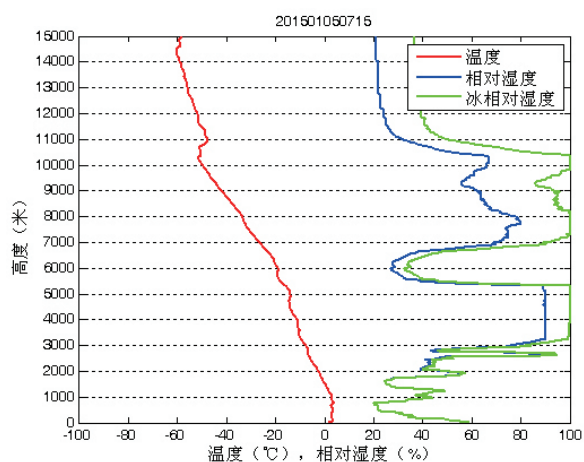


图1.3-22 1月20日19:15探空温湿廓线及毫米波测云仪反射率

1月05日7:15样本能见度2891m，卷云、高积云10-成，霾。在探空温湿廓线中，在2590-2711m、3065-5331m、6907-9147m共计三层云，而从毫米波测云仪反射率图中可以看出天顶有两层云，分别为2466-5916m、6846-9558m。探空第一层云厚度仅为121m，且顶高与上一层底高间隔354m，把探空第一层云和第二层云合并，则与毫米波测云仪云高信息对应一致。



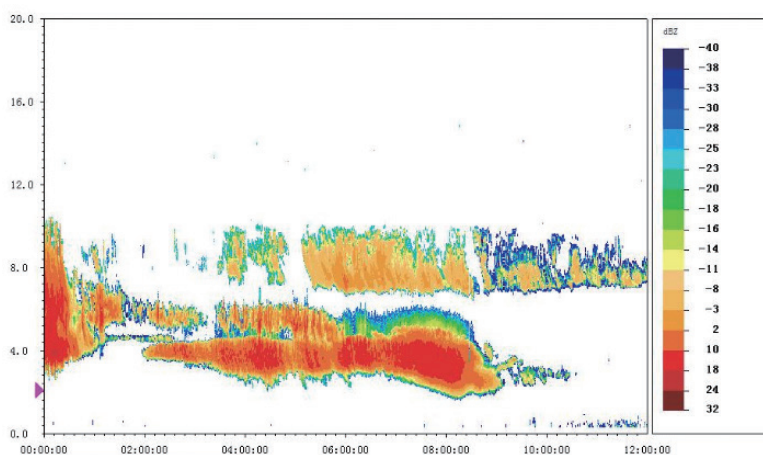


图1.3-23 1月05日7:15探空温湿廓线及毫米波测云仪反射率

1月14日7:15的样本能见度2781m，层积云10成，霾。在探空温湿度廓线中，在850-1575m、2302-5617m共有2层云，而从毫米波测云仪反射率图中可见云区为1194-6066m。和1月05日7:15样本一样，把探空两层云合并为850-5617m，则与毫米波测云仪的1194-6066m云高对应一致。

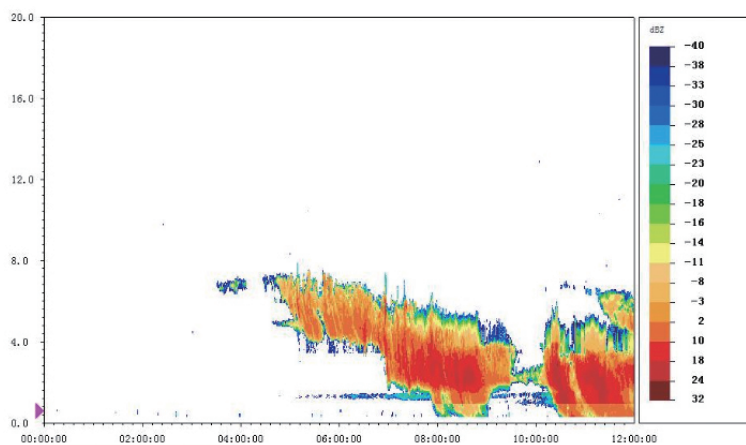
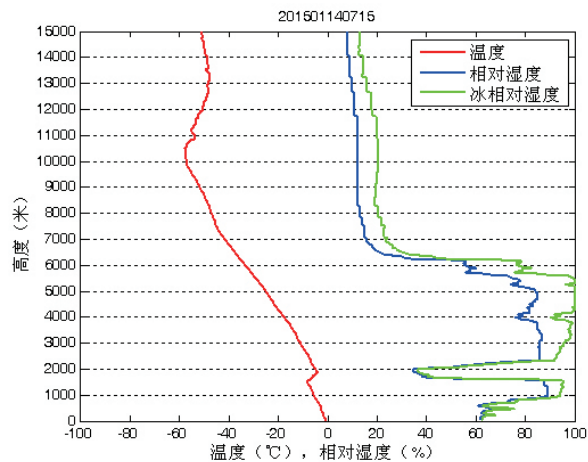


图1.3-24 1月14日7:15探空温湿廓线及毫米波测云仪反射率

3月29日19:15样本能见度7274m，卷云10-成，霾。在探空廓线中，在4751-6522m处有云层存在，而从毫米波测云仪反射率图中可见在4275-8201m有云层存在。通过查找毫米波测云仪原始云高数据和回波强度图，在7:30左右云体有降低加厚现象，云体变化较剧烈，探空（探空仪4500m高空距离放球点水平距离10800m）与毫米波测云仪探测位置（对象）不同导致二者云底高存有误差。

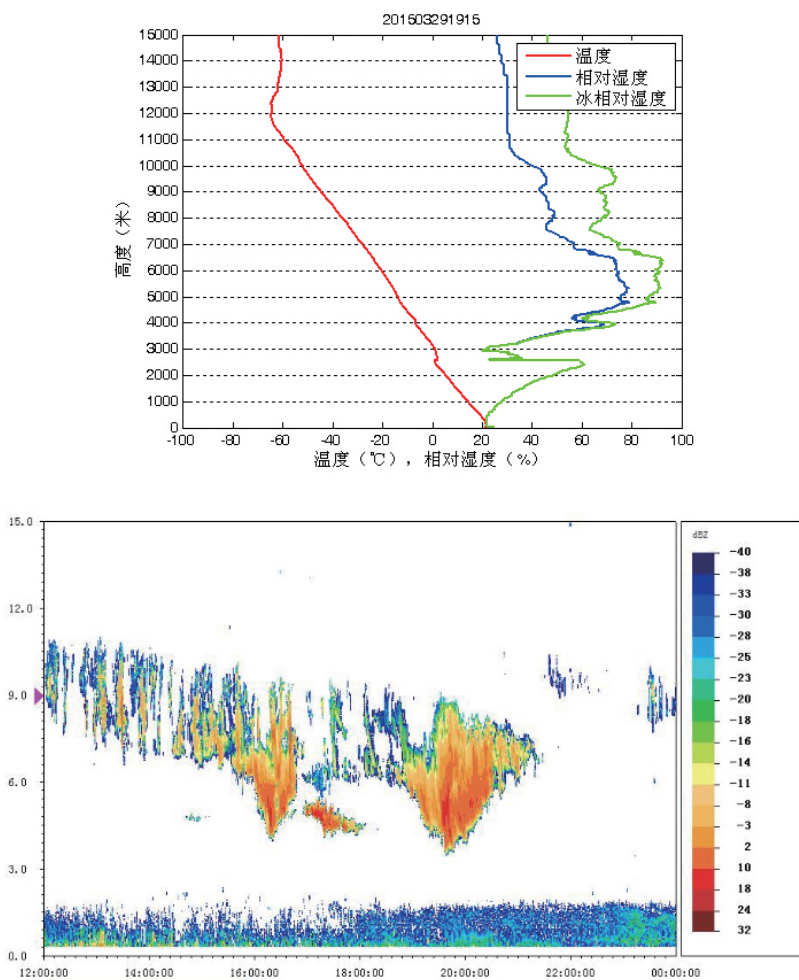


图1.3-25 3月29日19:15探空温湿廓线及毫米波测云仪反射率

4月6日7:15样本能见度33494m，卷云10-成。在探空温湿度廓线中，在4987-5241m处有云层存在，而从毫米波测云仪反射率图中可见在5202-8658m有云层存在。通过查找毫米波测云仪原始云高数据和观看回波强度图及对照可见光图片，在7:20左右云体较薄，没有达到3000m以上厚度，初步断定毫米波测云仪云顶高可能探测错误。

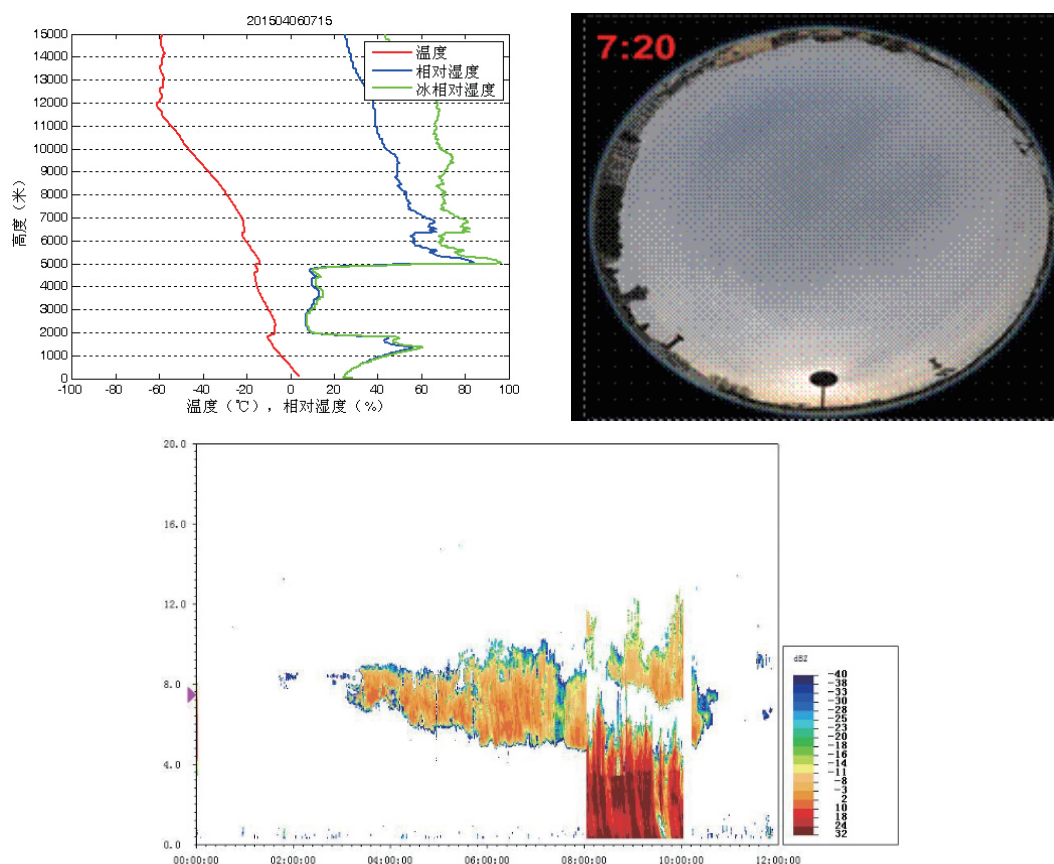


图1.3-26 4月6日7:15探空温湿廓线、可见光图片及毫米波测云仪反射率

通过上述特例分析，发现对于探空温湿廓线识别的云顶高度在10000m以上（探空仪温度约在-50℃以下），且厚度达到3000m的云体，基本是由于探空仪上的湿度传感器探测存在问题，具体表现在按照冰面饱和水汽压计算的相对湿度始终保持在100%以上，以水面饱和水汽压计算的相对湿度呈现缓慢下降，没有正负交替现象，对此类数据在分析云顶高时应该予以剔除。

通过对上述云顶偏差较大样本进行细致分析，结合全天空云图数据，对探空云顶高数据进行可靠性分析，然后重新对毫米波测云仪云顶高与探空云顶高数据进行对比，二者之间云顶高走势如图1.3-27。

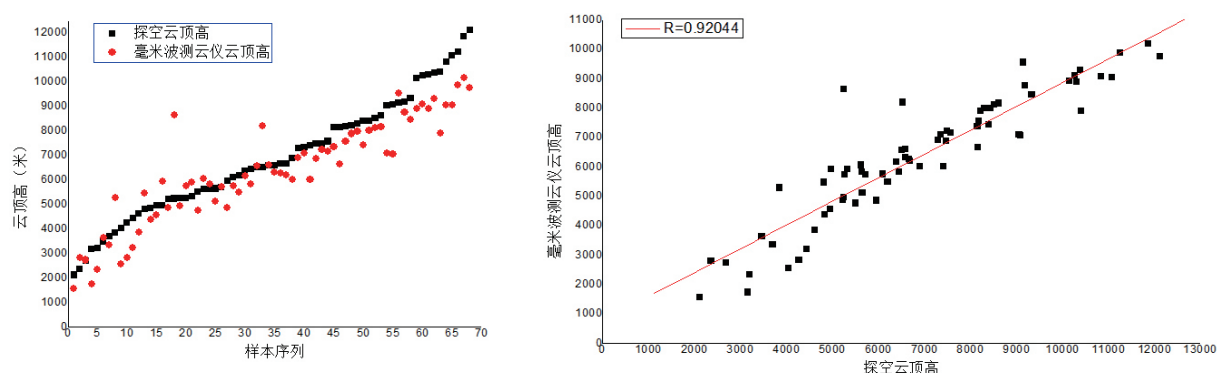


图1.3-27 分析后毫米波测云仪与探空云顶高对比

经分析后剩余68个云顶高对应样本（去除探空仪湿度传感器可能有问题的云顶高样本），毫米波测云仪平均云顶高比探空数据低522.9m，在探空云顶高小于8000m的所有样本中，毫米波测云仪平均比探空云顶高低190.8m，所有样本的平均相对误差为-6.6%，二者之间云底高相关性为 $R=0.92$ ，可见毫米波测云仪在云顶高探测方面具有较高的准确性。

经分析发现毫米波测云仪所测云顶高度与探空云顶高一致，但在探空云顶高8000m以上时毫米波测云仪探测数据偏小，造成这种现象可能有如下原因：（1）探空仪在上升到万米高空后，通过冰面饱和水汽压计算相对湿度明显大于通过水面饱和水汽压计算的相对湿度，换算可能会带来相对湿度偏差。（2）探空仪湿度传感器在结冰状态下在高空出云时反应滞后，造成探空云顶高偏高。（3）由于探空仪的漂移，两者探测云体（对象）位置不同，造成探测数据出现偏差。

④ 3个设备与探空同时有云对比

CYY-2B激光云高仪、HY-CL51激光云高仪、毫米波测云仪去除数据缺测样本外，与探空同时共有32个有云样本，四者之间云高走势如图1.3-28所示。走势图中CYY-2B激光云高仪在第27个样本点（3月18日7:15）数据明显偏低情况已经在前文进行过细致的分析。毫米波测云仪在第5、9、10、11、12共5个样本时刻与其它3种设备数据差别较大，如表1.3-11分析。

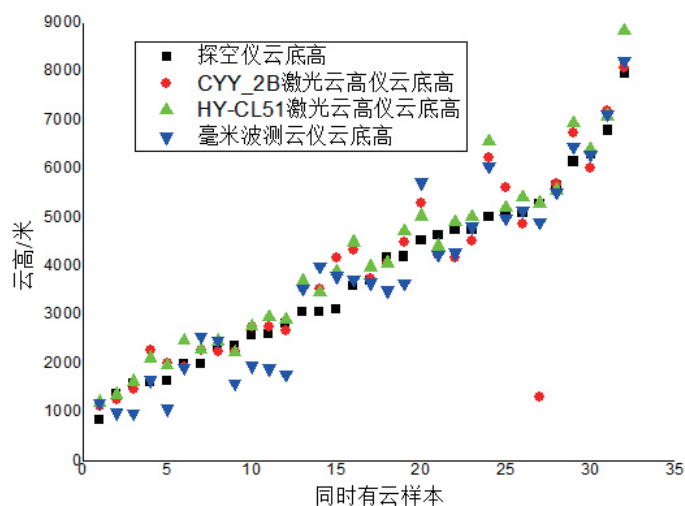


图1.3-28 探空仪云底高与3种测云设备同时有云样本走势



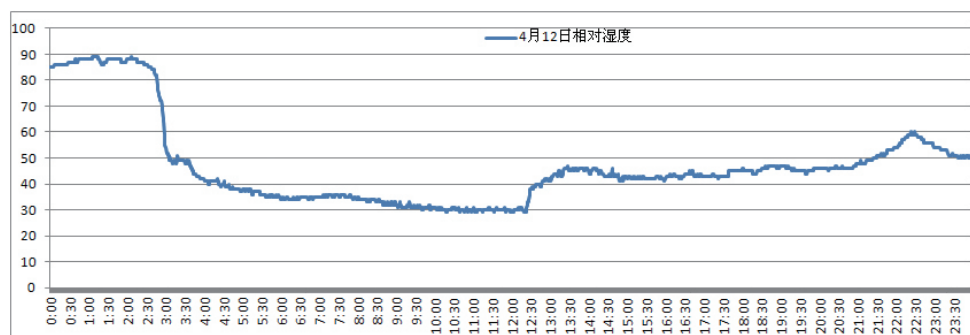
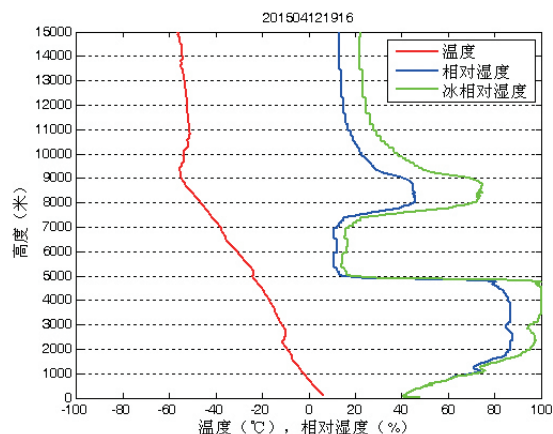
表1.3-11 毫米波测云仪云底高相差较大样本信息

样本	样本时间	探空云底高	CYY-2B 云底高	HY-CL51 云底高	毫米波 云底高	能见度	天气状况
5	201504121916	1638	2020	1970	1068	34987	卷云 层积云10-
9	201505150716	2364	2254	2230	1600	16359	层积云10-
10	201501180716	2596	2753	2780	1950	2314	10-
11	201502151915	2609	2746	2960	1902	3368	高层云10
12	201504011917	2829	2672	2910	1785	18497	高层云10

样本5的情况是2个激光云高仪云底比探空云底高400m，激光云高仪探测的是探空湿度达到最大值时刻所对应的高度，但从两个激光云高仪云体演变图中可见在对应时刻云底下部有明显水汽带。而毫米波测云仪比探空低600m，其探测到的是探空相对湿度急速上升中间阶段所对应的高度，从图1.3-29的探空廓线中发现湿度缓慢上升，没有骤变现象存在，云底界限在探空廓线中不明显，探空识别算法导致探空云底高度偏高。

表1.3-12 毫米波测云仪云底高误差较大样本信息

样本	样本时间	探空云底高	CYY-2B 云底高	HY-CL51 云底高	毫米波 云底高	能见度	天气状况
5	201504121916	1638	2020	1970	1068	34987	卷云 层积云10-



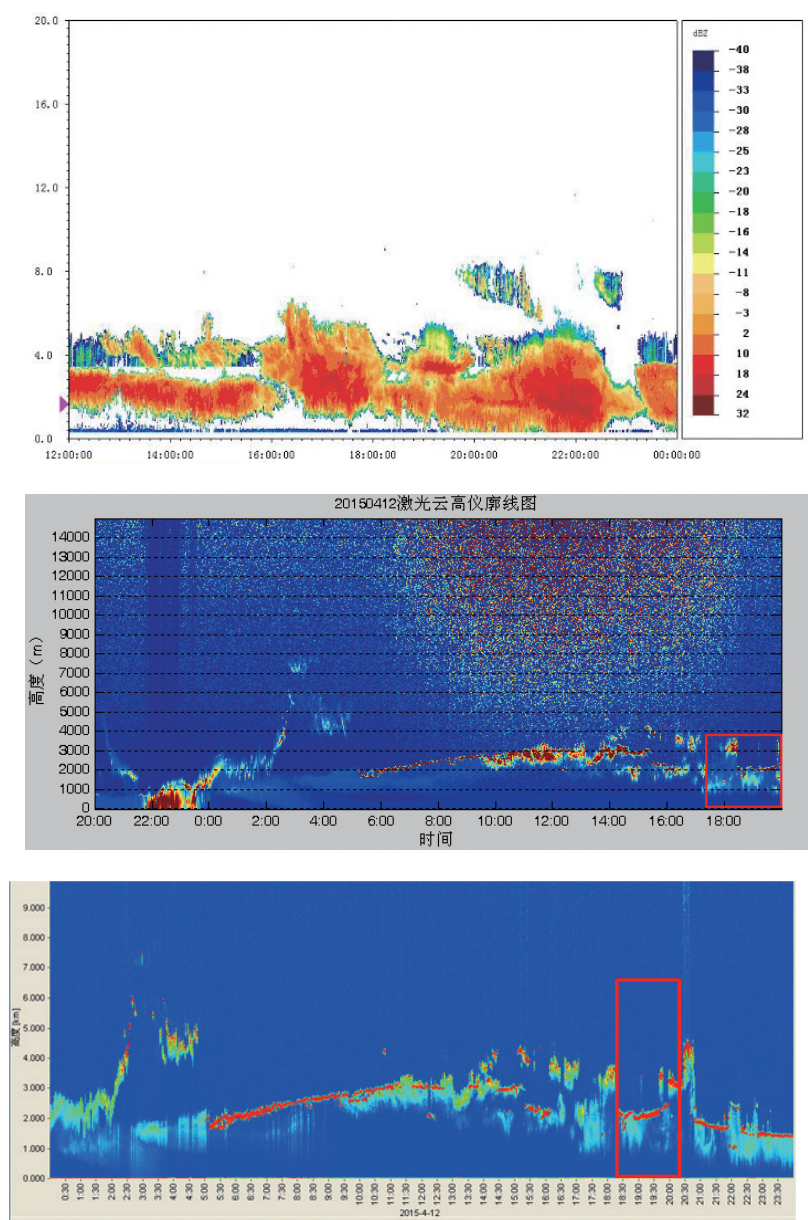


图1.3-29 4月12日探空温湿廓线、可见光图片、地表相对湿度线、毫米波测云仪反射率及激光云高仪云图

5月15日7:16云高情况是2个激光云高仪云底高与探空云底高相近，而毫米波测云仪比探空云底高度低700m，地面自动站相对湿度40%以下，但两个激光云高仪云底下部均有明显水汽带，激光云高可能偏高。从探空湿度度廓线中发现相对湿度持续上升，云底难以明确得出，探空云底高度算法导致探空云底高度偏高，毫米波测云仪探测数据可信度更高。

表1.3-13 毫米波测云仪云底高误差较大样本信息

样本	样本时间	探空云底高	CYY-2B 云底高	HY-CL51 云底高	毫米波 云底高	能见度	天气状况
9	201505150716	2364	2254	2230	1600	16359	层积云10-

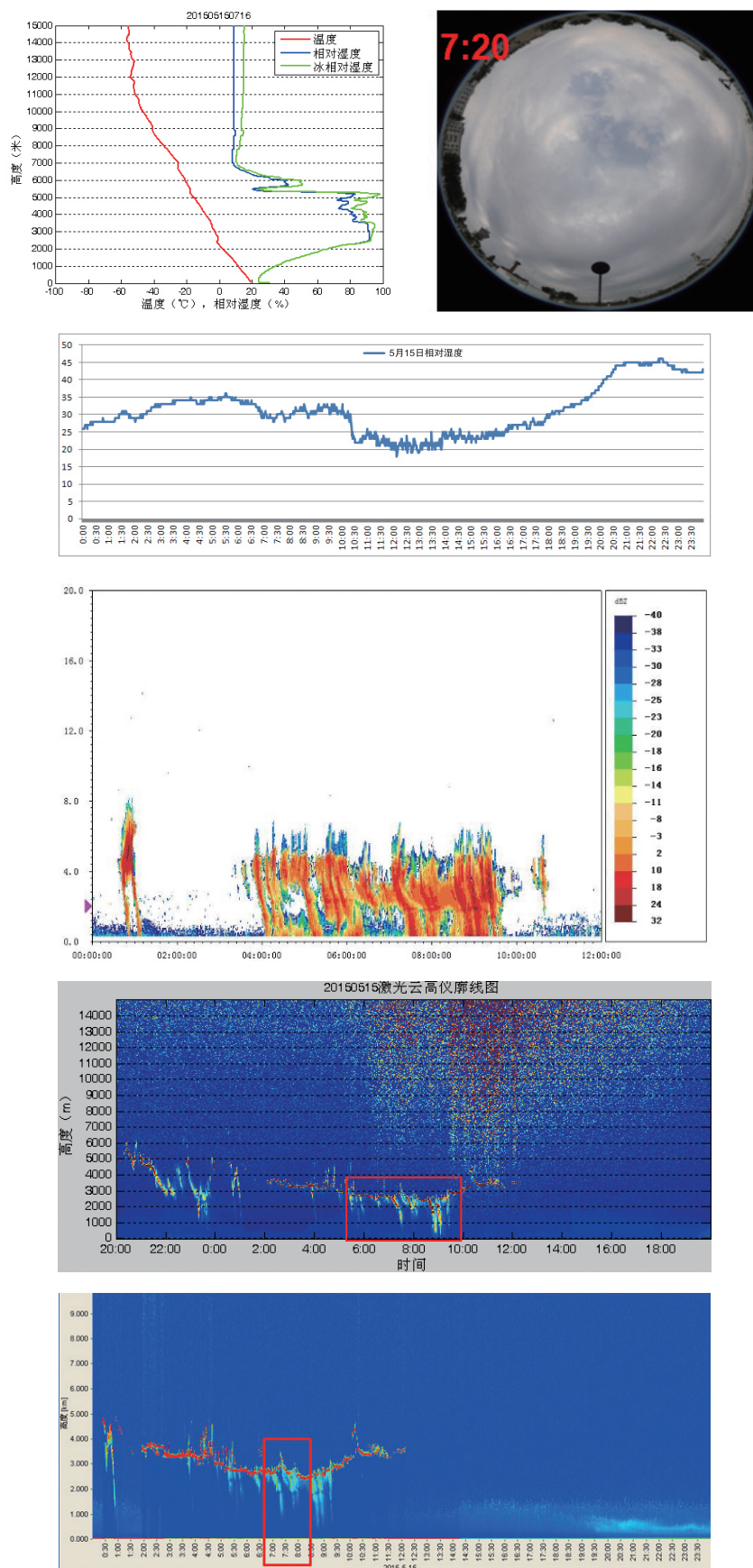
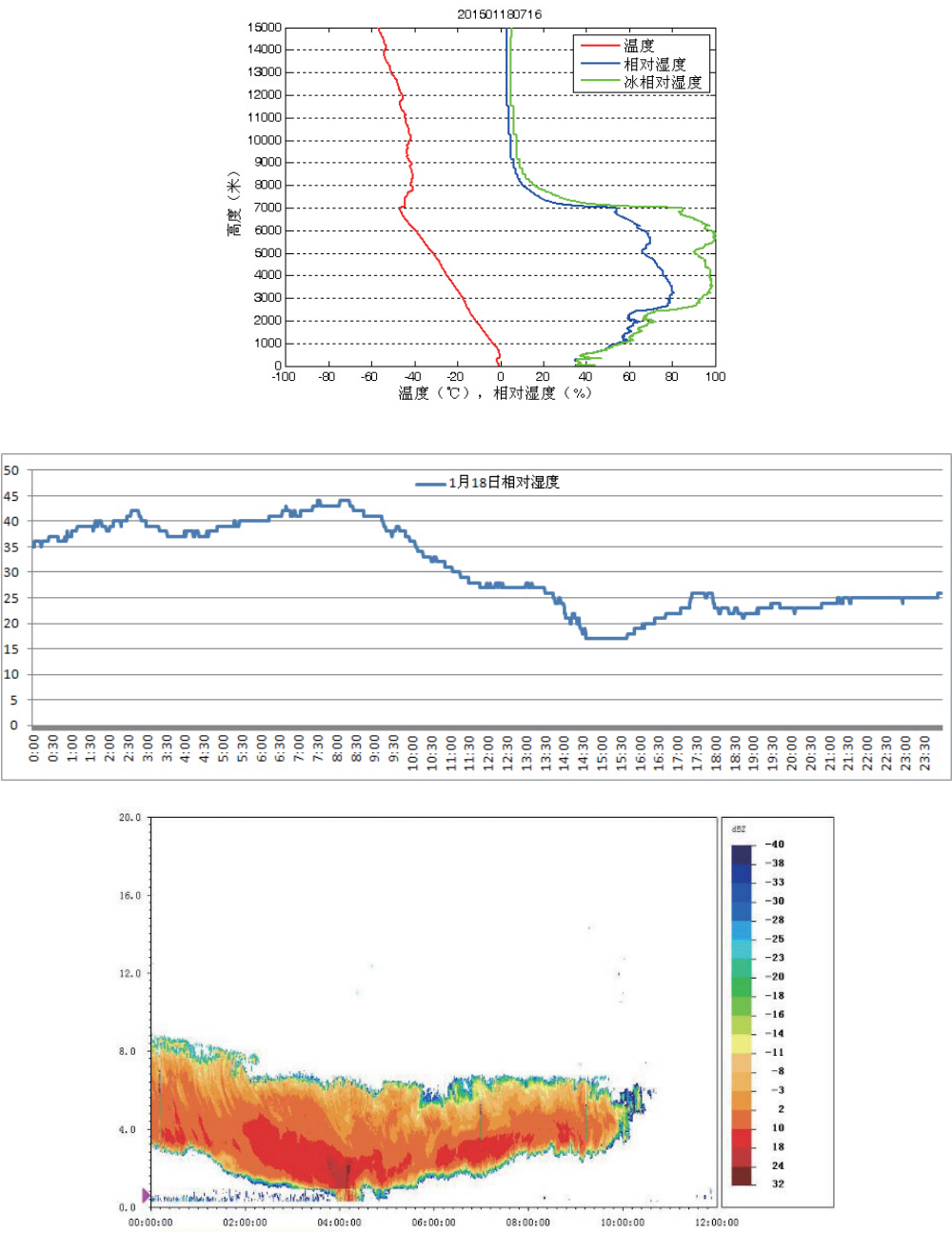


图1.3-30 5月15日探空温湿廓线、可见光图片、毫米波测云仪反射率及激光云高仪云图

1月18日地面自动站测定空气的相对湿度40%以下，7:16云高情况是2个激光云高仪云底高与探空云底高接近，探测的是探空仪湿度达到最大值所对应的高度，但两个激光云高仪云高演变图中云底下方均有明显的水汽带，说明激光探测的云底偏高。毫米波测云仪比探空低600m，探空云底高度算法导致探空云底高度偏高，毫米波测云仪探测数据可信度更高。

表1.3-14 毫米波测云仪云底高误差较大样本信息

样本	样本时间	探空云底高	CYY-2B 云底高	HY-CL51 云底高	毫米波 云底高	能见度	天气状况
10	201501180716	2596	2753	2780	1950	2314	卷云10-



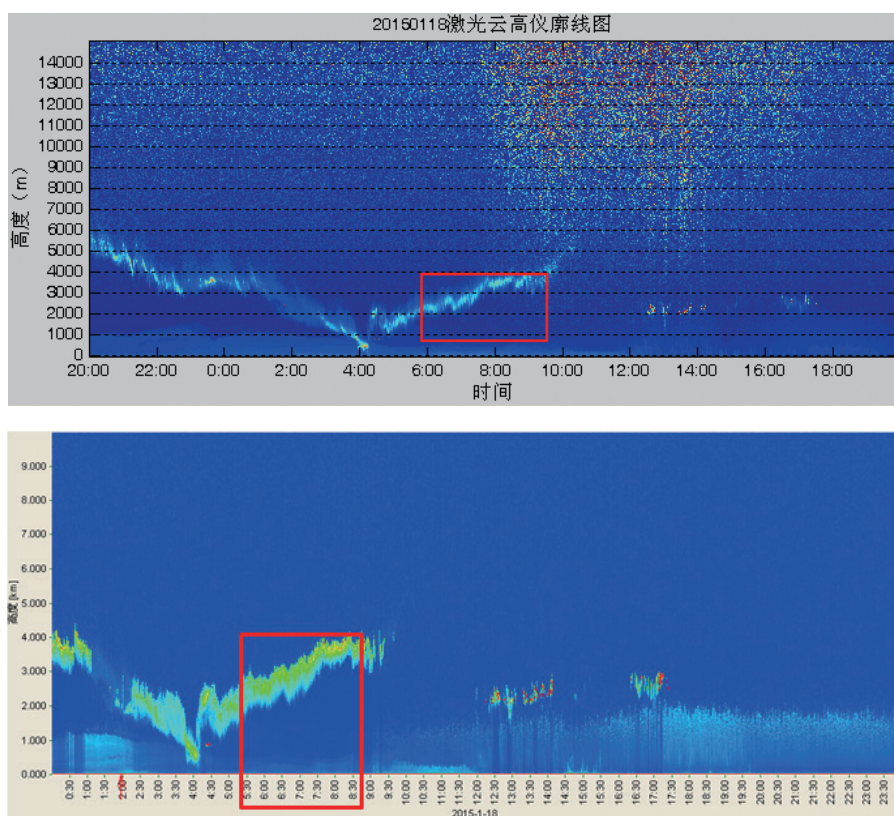
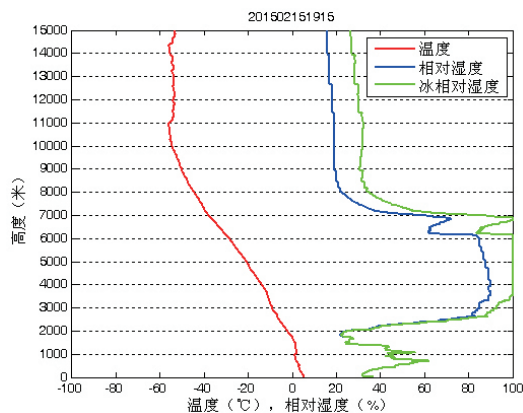


图1.3-31 1月18日探空温湿廓线、地表相对湿度线、毫米波测云仪反射率及激光云高仪云图

2月15日19:15云高情况是2个激光云高仪云底高与探空云底高吻合较好，探测的是湿度达到最大值所对应的高度。而毫米波测云仪比探空低700m，探空云底高度算法导致探空云底高度偏高，毫米波测云仪探测数据可信度更高。

表1.3-15 毫米波测云仪云底高误差较大样本信息

样本	样本时间	探空云底高	CYY-2B 云底高	HY-CL51 云底高	毫米波 云底高	能见度	天气状况
11	201502151915	2609	2746	2960	1902	3368	高层云10



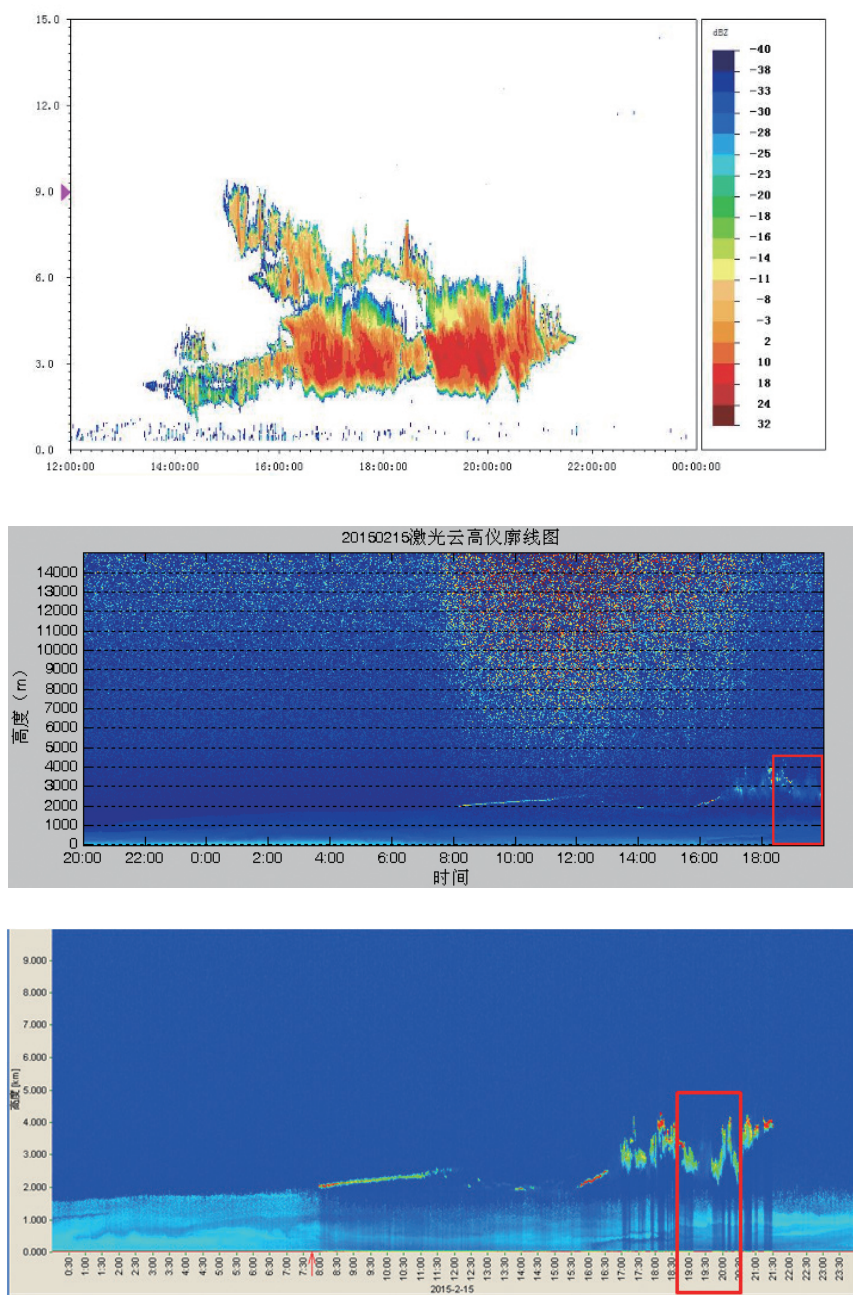


图1.3-32 2月15日探空温湿廓线、毫米波测云仪反射率及激光云高仪云图

4月1日地面自动站测定空气的相对湿度40%以下，属于较干燥水平。19:17分云高情况是2个激光云高仪云底高与探空云底高接近，但云底高分布线下方水汽带明显，判定激光云高仪探测的云底偏高。从温湿度廓线中发现云底约为2500m左右，毫米波测定数据较为可靠。

表1.3-16 毫米波测云仪云底高误差较大样本信息

样本	样本时间	探空云底高	CYY-2B 云底高	HY-CL51 云底高	毫米波 云底高	能见度	天气状况
12	201504011917	2829	2672	2910	1785	18497	高层云10

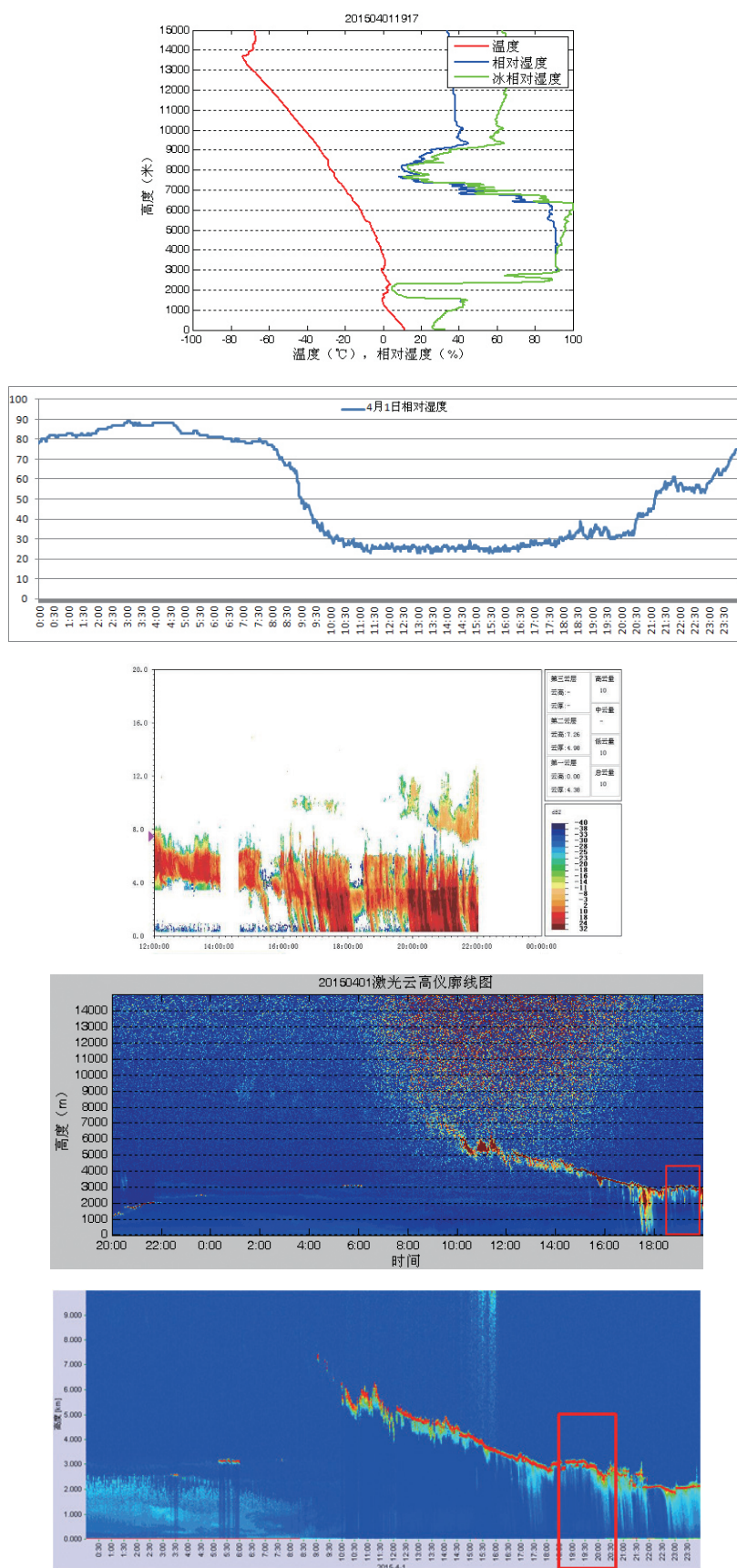


图1.3-33 4月1日探空温湿廓线、地表相对湿度线、毫米波测云仪反射率及激光云高仪云图

通过对毫米波测云仪与探空云底高相差较大样本进行分析，发现在几个样本中地面空气相对湿度基本较小的情况下，仅发现2个激光云高仪云底线下方有较明显的水汽带，说明激光云高仪探测云底偏高。另外探空相对湿度廓线较缓慢上升，云底不易确定，探空云底高判别方法造成云底高判别偏高，毫米波测云仪探测数据相比更具有准确性。

（3）小结

按照文献中给定的探空廓线识别云体方法，结合可见光图片、近红外全天空图片对2015年1-5月份探空数据进行分析，通过探空测定的云体信息对3台云观测设备进行对比分析，初步分析结论如下：

①CYY-2B激光云高仪、HY-CL51激光云高仪、毫米波测云仪与探空云高均具有较高的相关性，其中毫米波测云仪的云底高观测精度最高，HY-CL51激光云高仪次之，CYY-2B激光云高仪最低。

②3台云观测设备数据获取率各不相同，其中毫米波测云仪获取率明显高于HY-CL51激光云高仪、CYY-2B激光云高仪，特别是在中高层云探测方面。

③激光云高仪在数据获取方面易受低能见度影响，随着能见度降低数据获取能力变差，而毫米波测云仪数据获取率与能见度关系不大。

④毫米波测云仪在云顶高（云厚）观测方面，性能优于激光云高仪，能够获取较高精度的云顶高信息，特别是中低层云顶高。

1.3.3 各设备探测能力特例分析

（1）多层云探测能力分析

由于云层对激光能量衰减很强，激光云高仪发射的激光在到达云底时就产生很强的后向散射一般很难穿透整个云层，激光云高仪能够探测到8千米以下的云底高度和云量（积分云量）。毫米波测云仪主要以35GHz毫米波波段为发射源，间歇性地向空中发射电磁波(脉冲)，然后接收云目标散射回来的电磁波(回波)，利用回波信息反演计算得到云信息，具有穿透能力强等特性，能够穿过较厚云层并获取上方多层云信息。

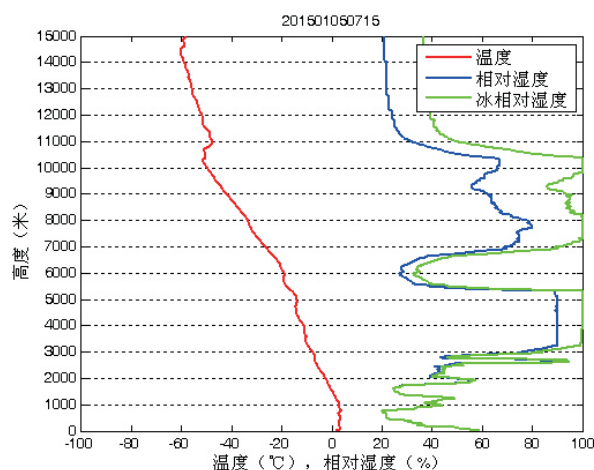
在2015年1-5月的探空对比数据中，探空共有14次明显的两层云现象，其中CYY-2B激光云高仪共探测到0次，HY-CL51激光云高仪探测到2次，毫米波测云仪探测到11次（其中1次降水，毫米波云底高输出0）两层云现象。各设备探测情况如表1.3-17分析。



表1.3-17 3种地基云观测设备双层云探测样本信息

样本时间	探空云底高		CYY-2B云底高		HY-CL51云底高		毫米波云底高	
	第一层	第二层	第一层	第二层	第一层	第二层	第一层	第二层
201501030716	2684	6952	缺测		3060		2022	6591
201501050715	2590	6907	缺测		4340		2466	6846
201501141915	854	6056	1897				1512	6120
201501281915	3452	5406				5660	3765	5992
201503120715	4419	5572				7400		5520
201503160715	239	4783	442		480			5117
201503301915	1544	6981	2400		2750	7120	1125	7098
201503310715	597	4608			990		0	4400
201505061916	4601	6156	4265		5500		4422	6090
201505071915	3124	6382	4166		3900		3796	6600
201505081915	3136	7286			3790	8290		6960
201505090715	2192	7737	2276		2180		2500	7902
201505100716	1383	4472	1274		1370		990	4580
201505281915	3700	6157	3737		3990		3660	6400

图1.3-34为2015年1月5日7:15样本的特例分析，从探空温湿廓线中明显看到在2590-5331m、6907-9147m处有两层云存在，同样在毫米波测云仪的反射率强度图中确实有两层云信息，且云高信息与探空所测数据对应一致。而HY-CL51激光云高仪只明显测到了第一层云，第二层云回波较弱。



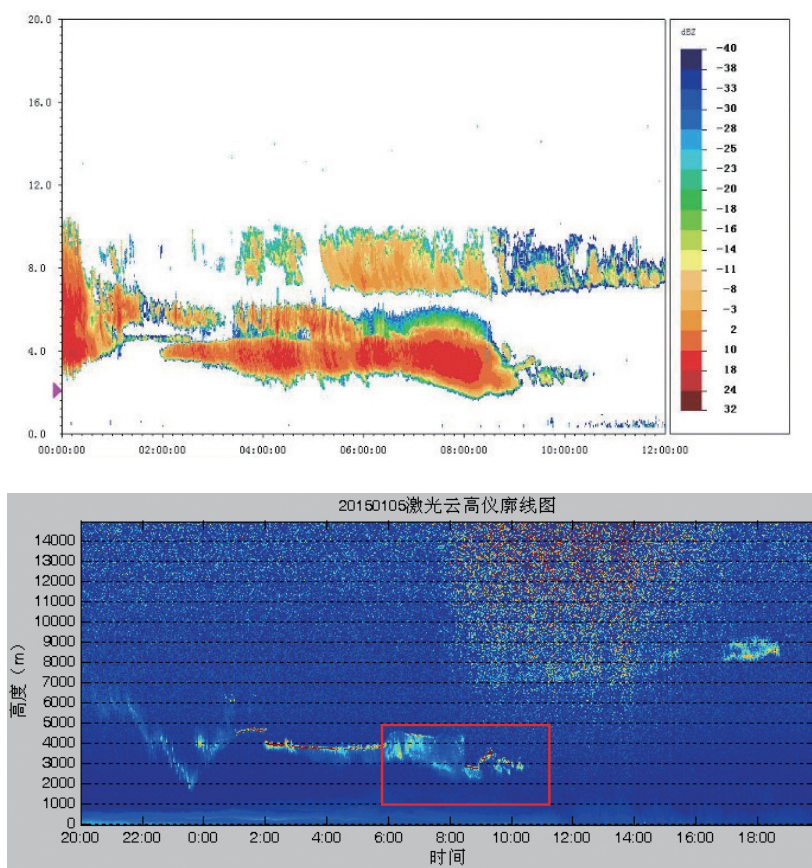
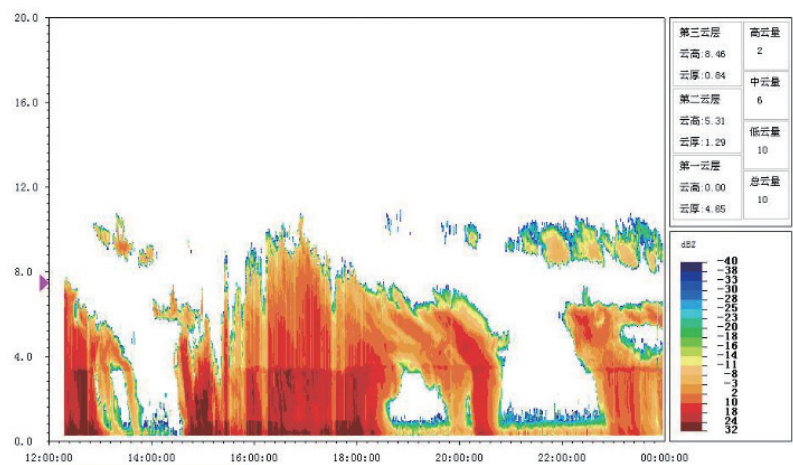


图1.3-34 1月5日7:15探空温湿廓线、毫米波测云仪反射率、激光云高图

图1.3-35为2015年8月30日19:15样本的特例分析，从探空温湿廓线中明显看到在3436m-7703m、10203m-11201m处有两层云存在，同样在毫米波测云仪的反射率强度图中确实有两层云信息，分别为3200m-6475m（19:10-19:15）、9905m-10075m（19:42-19:48），通过分析发现探空云高与毫米波测云仪所测两层云信息基本能够对应一致。而CYY-2B激光云高仪只探测到3500m的第一层云。



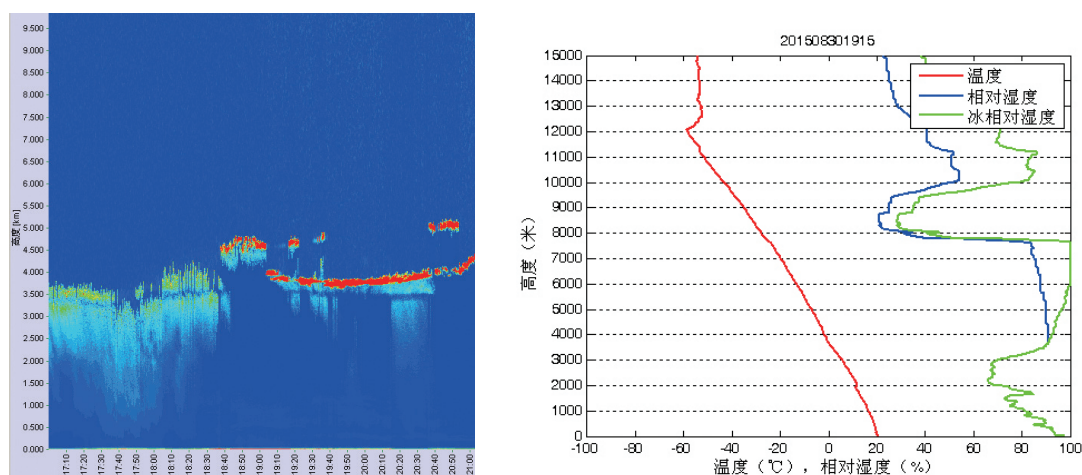
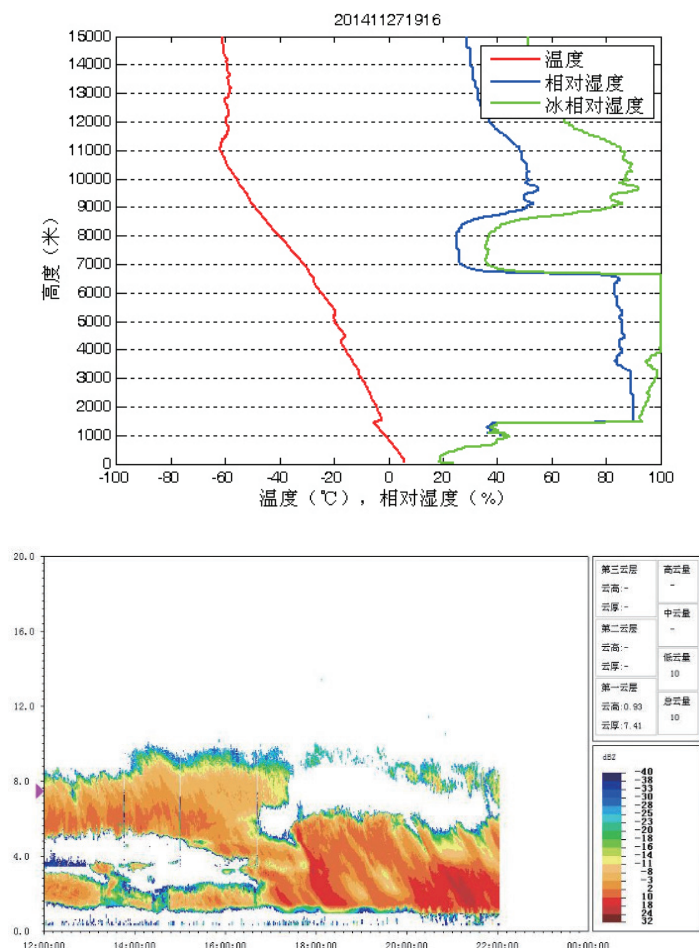


图1.3-35 2015年8月30日17:00-21:00测云仪与探空观测云实例对比

图1.3-36表明2014年11月27日19:15，探空温湿廓线中在1459m-6644m、9509m-11209m有两层云存在。在毫米波测云仪的反射率强度图中有1032m-6306m、9372m-9642m的两层云存在，与探空云体对应一致，说明毫米波测云仪能够穿透5000m云层，进而测到更高的云层信息。而2个激光云高仪在同一时间段内均未测到第二层云。



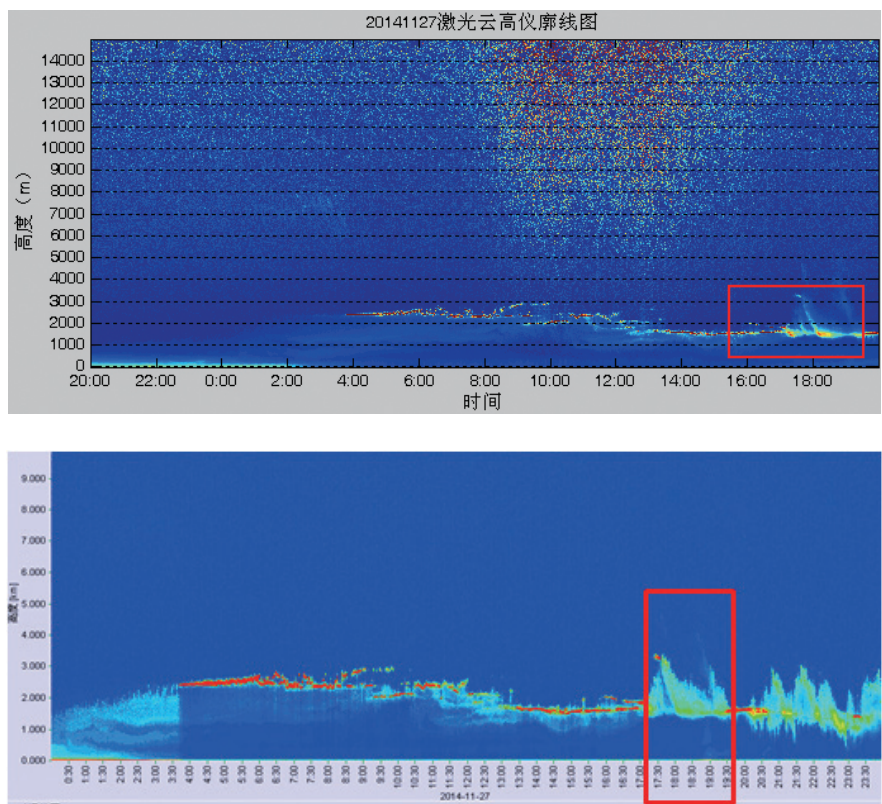
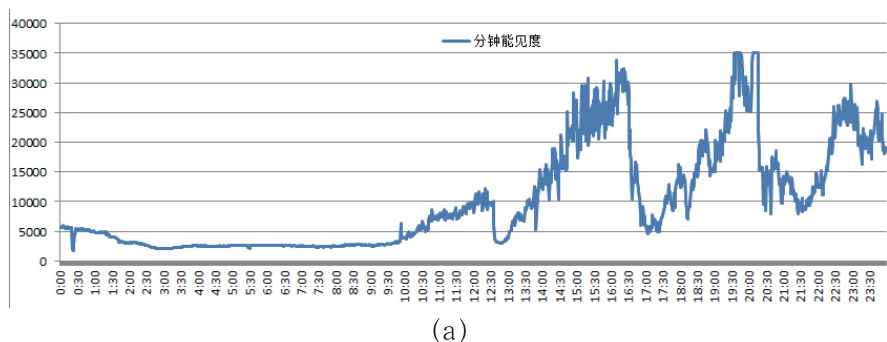


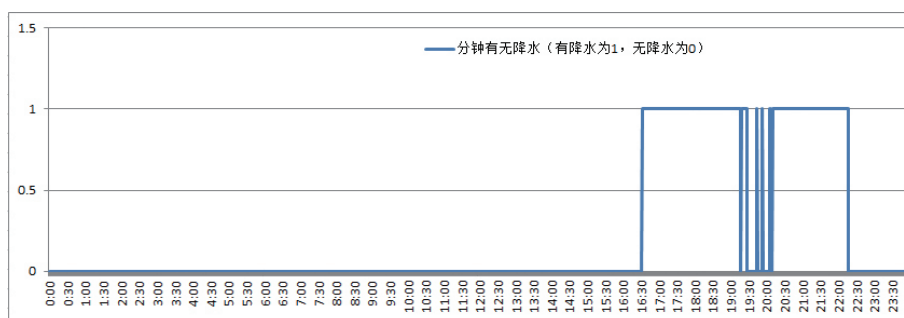
图1.3-36 2014年11月27日探空、测云仪与激光云高仪实例对比

通过对上述样本进行分析，发现毫米波测云仪具有比激光云高仪穿透低层云进而获取多云层的能力，甚至能够穿透5000多米厚度的云层而获得其上空更高的多层云，且能够得到整个云体的反射率因子，并与探空云体结果保持较好的一致性。

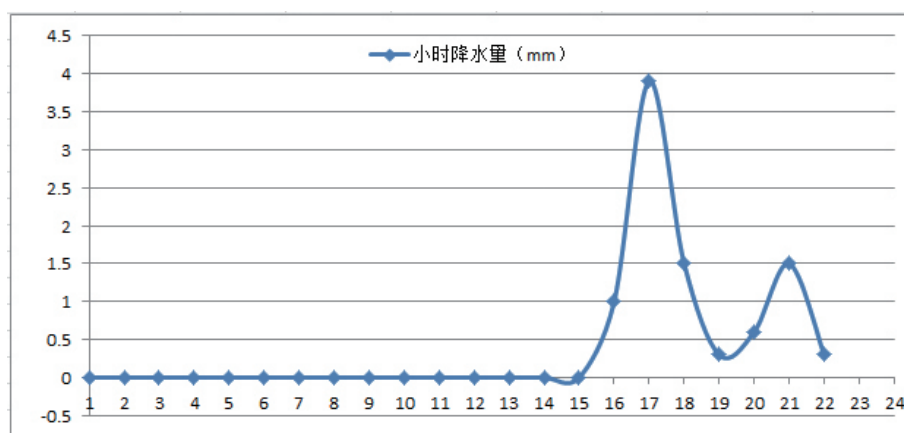
(2) 降水时探测能力分析

发生降水时水汽较大，不同设备探测能力表现不一。结合不同的云观测设备和地面观测要素，对2015年5月1日的降水天气过程中，设备的观测情况和地面自动站气象要素的变化趋势进行统计分析，其中天气现象中有降水时刻为1，无降水时刻数据为0，各设备数据情况见图1.3-37。

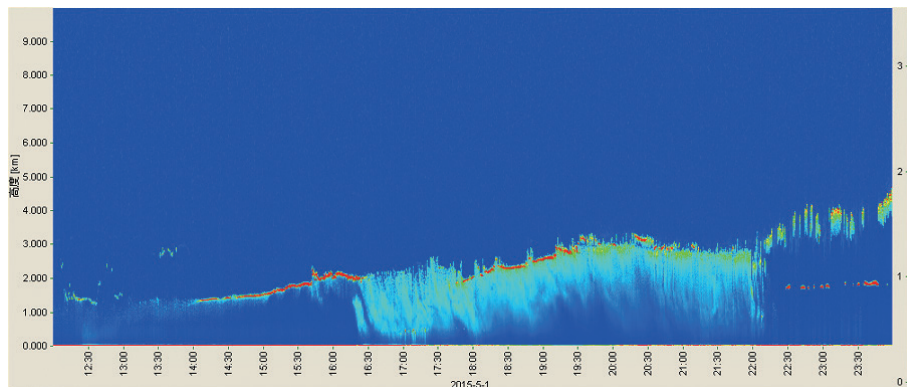




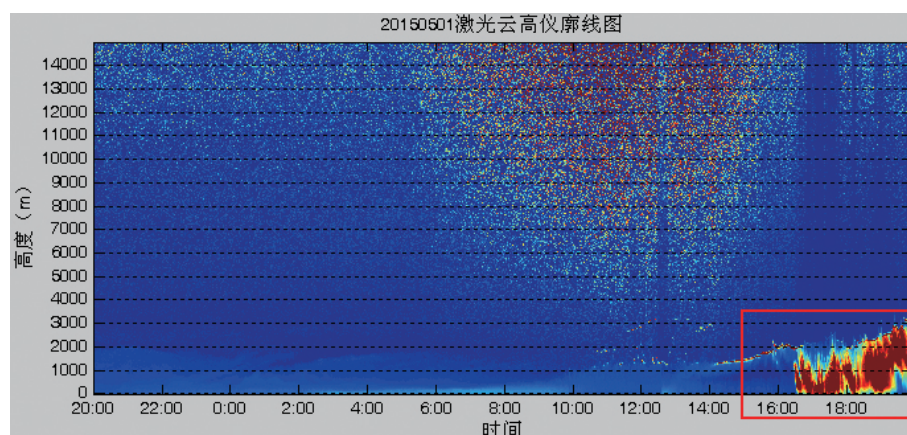
(b)



(c)



(d)



(e)

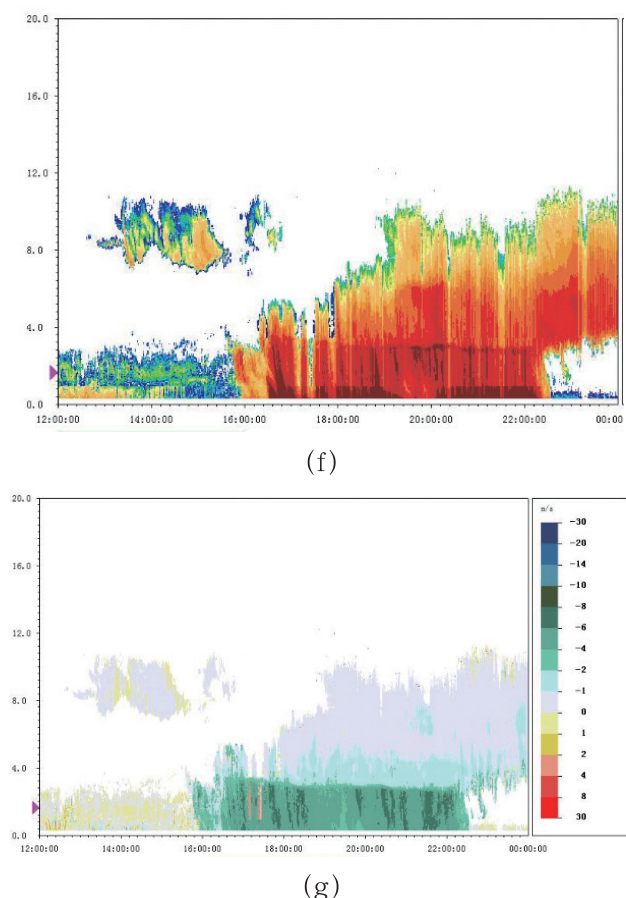


图1.3-37 2015年5月1日各设备分数据走势图

(a) 自动站分钟能见度 (b) 天气现象分钟数据 (c) 小时累计降水量 (d) CYY-2B激光云高仪云高
(e) HY-CL51激光云高仪云高 (f) 毫米波测云仪反射率图 (g) 毫米波测云仪速度谱

从上述个例可以看出，降水出现在16:30-22:20之间，在出现降水时间段内，CYY-2B激光云高仪不能给出准确的云层信息，HY-CL51激光云高仪不能给出云底信息。在发生降水的过程中，雨量的大小对激光云高仪的观测有影响，当雨量较大时（16:00-18:00、21:00-22:00），激光云高仪观测不到云高信息，雨量较小时刻激光云高仪对云观测的云高偏高，有误报的情况发生。总体上在降雨时，激光云高仪不能输出可靠的云观测数据。

从毫米波测云仪的反射率图中看到，在16:00-22:30时刻水汽到达近地面，分辨不出云底信息，此段时间正好对应降水时刻，在降水发生时，云雷达较完整的观测到云和降水回波，并且还可以给出速度谱数据，但是目前不能明确给出云底信息。

(3) 卷云时探测能力分析

卷云一般较高且薄，大多由冰晶组成，云底一般在4500m-10000m。它由高空的细小冰晶组成，且冰晶比较稀疏，故云比较薄而透光良好，色泽洁白并具有冰晶的亮泽。

在2015年1-5月份的探空数据中，云高为4500m以上，且人工记录为卷云的样本数58个，由于观测设备缺测现象存在，各设备数据获取情况见表1.3-18分析。



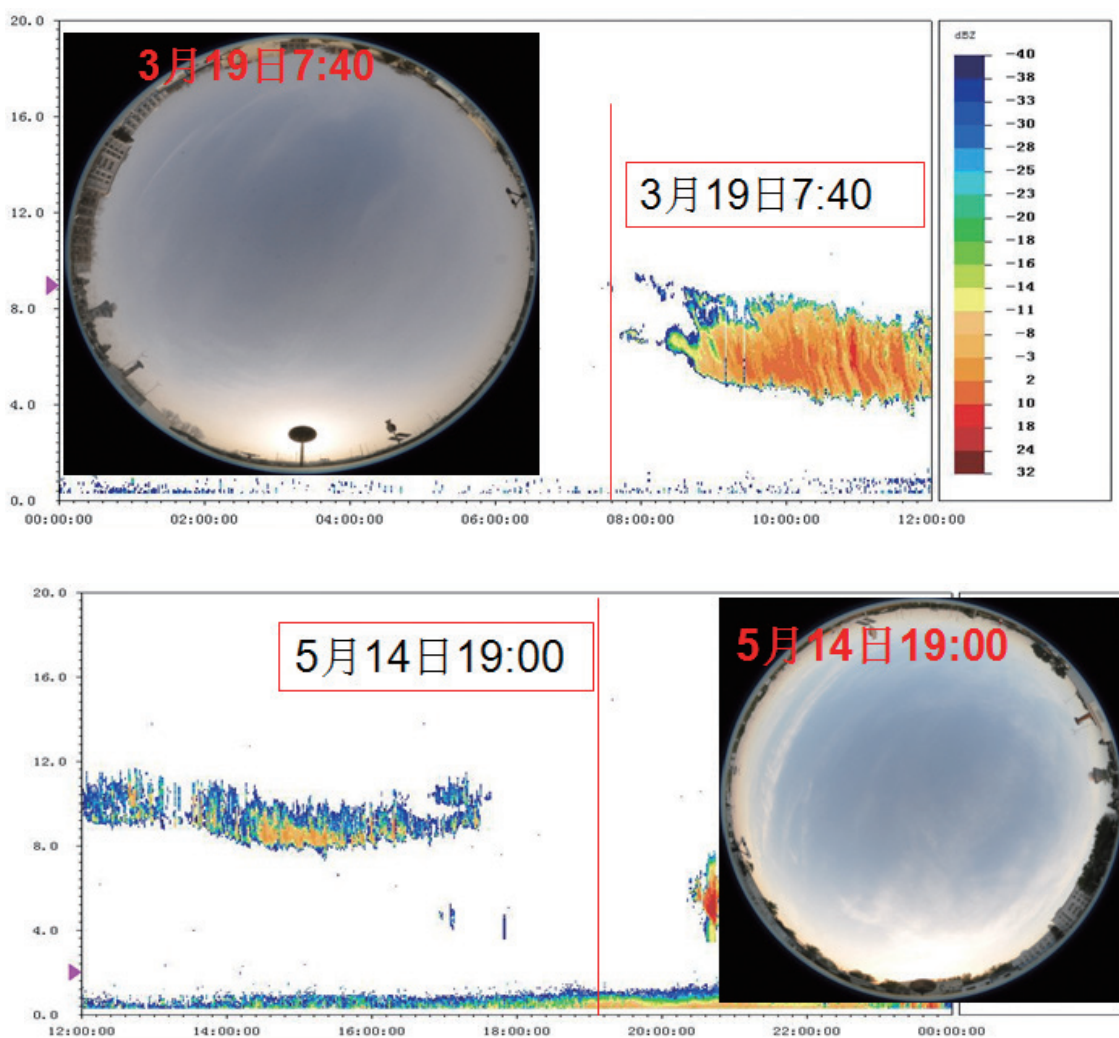
表1.3-18 对比试验期间各设备卷云数据获取情况

观测设备	探空样本数	观测设备样本数	获取率
CYY-2B激光云高仪	52	17	32.7%
HY-CL51激光云高仪	57	42	73.7%
毫米波测云仪	54	52	96.3%

从上表分析，在卷云探测能力方面毫米波测云仪远高于激光云高仪，只有2次没有探测到。其次为HY-CL51激光云高仪，CYY-2B激光云高仪数据获取率最低，下文对选取特征样例进行细致分析。

① 毫米波测云仪漏测样本分析

毫米波测云仪漏测的两个样本分别为2015年3月19日7:15、5月14日19:15。对应时刻可见光图片、探空温湿廓线数据、毫米波反射率图片如图1.3-38所示。



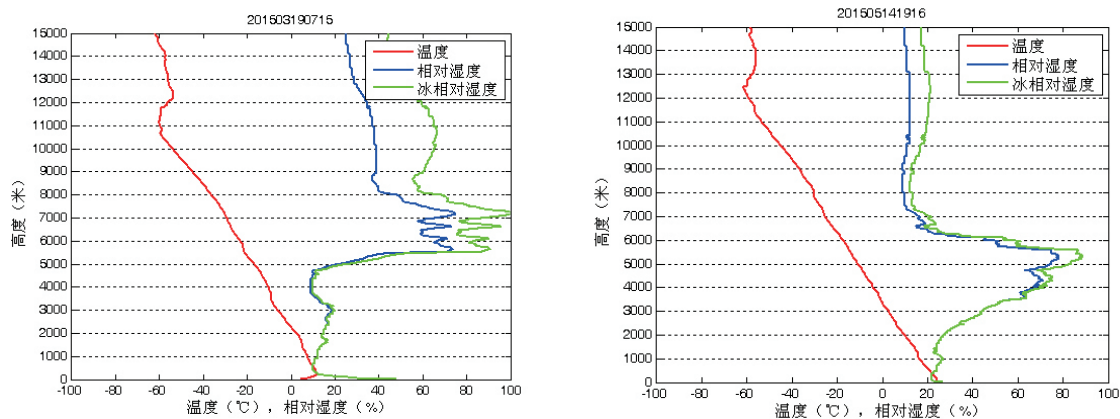
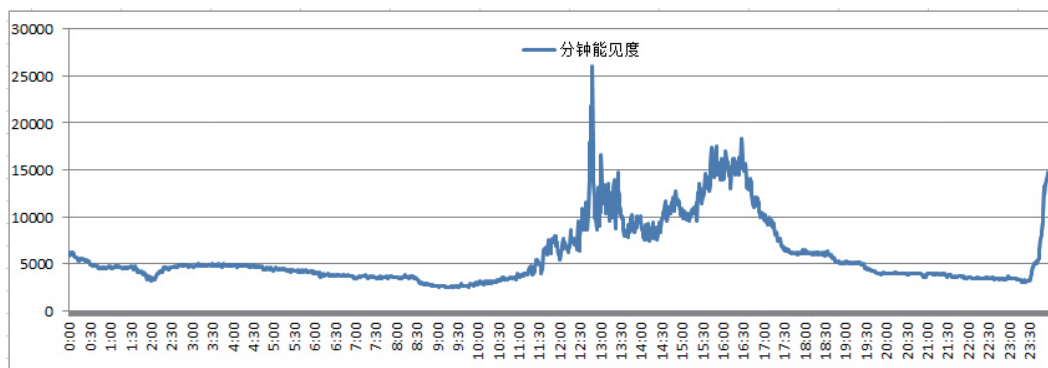


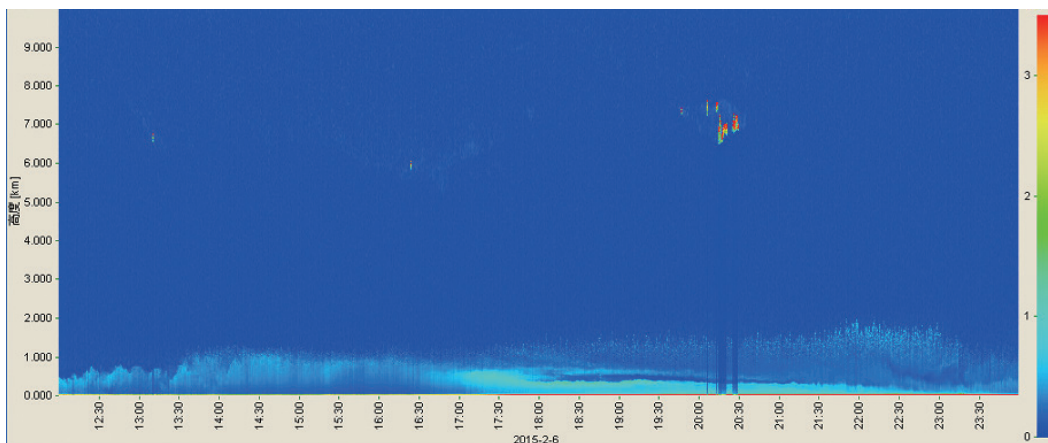
图1.3-38 毫米波测云仪卷云漏测样本实例分析

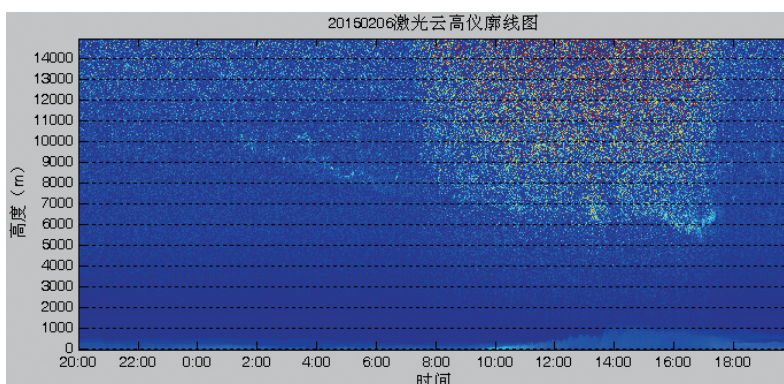
从图1.3-38的可见光云图中可见在两个样本对应时刻天空确实有非常薄的卷云存在，从探空温湿度廓线数据中看到卷云高度为5000m以上，从湿度变化同样发现卷云稀薄。在3月19日7:40毫米波测云仪反射率图中开始出现卷云，且云高在6000m以上；而5月14日放球时刻毫米波测云仪漏判。从侧面也可以证实，毫米波测云仪确实有较强的卷云探测能力。

② 2月6日样本实例分析

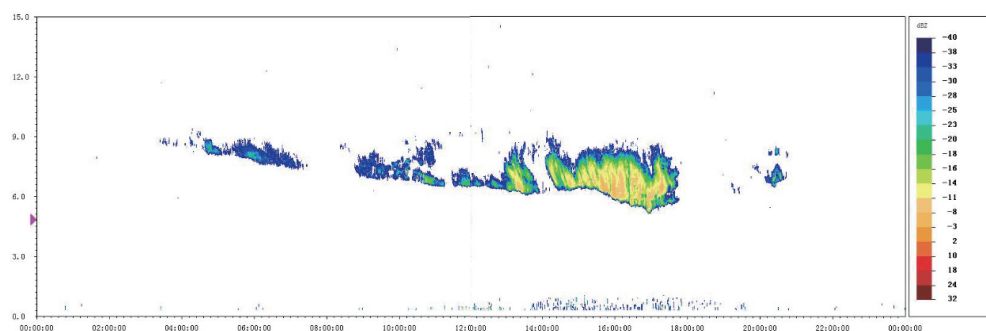


(a)

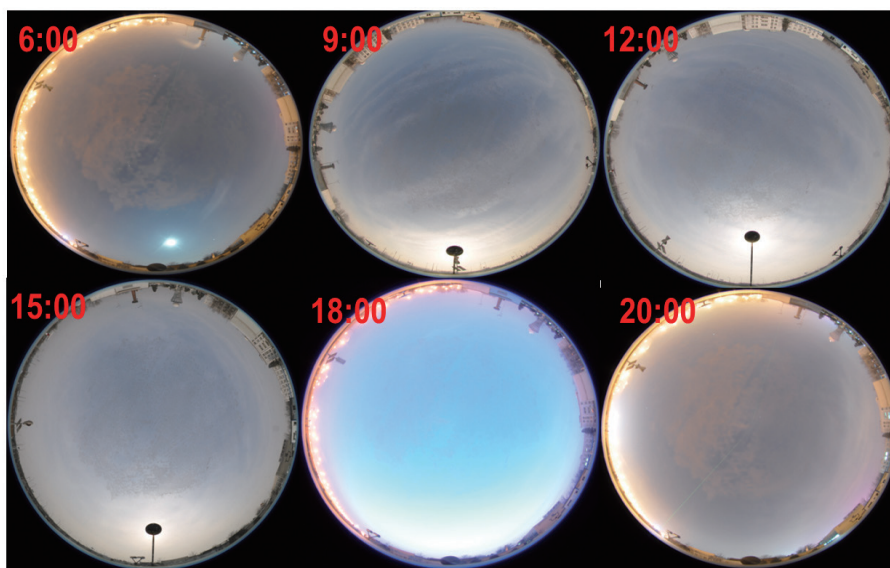




(b)



(c)



(d)

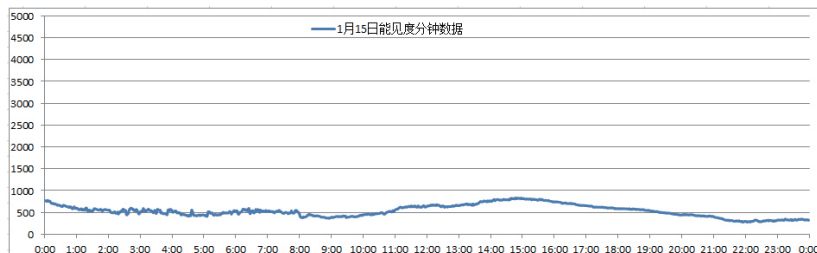
图1.3-39 2015年2月6日 (a) 自动站分钟能见度 (b) CYY-2B激光云高仪云高走势 (c) 毫米波测云仪反射率 (d) 全天天空云图

从图1.3-39中可见光云图中可发现在6:00-20:00过程中18:00左右由于光线导致云纹理不明显外, 其余时刻均可见有卷云存在, 从毫米波测云仪的反射率图中可以证实这点, 而CYY-2B激光云高仪只有在20:00附近观测到7000m附近的少量卷云, HY-CL51激光云高仪在16:00之后也有6000m以上的云体回波, 但回波强度较弱, 而毫米波测云仪则可以持续探测到卷云存在。

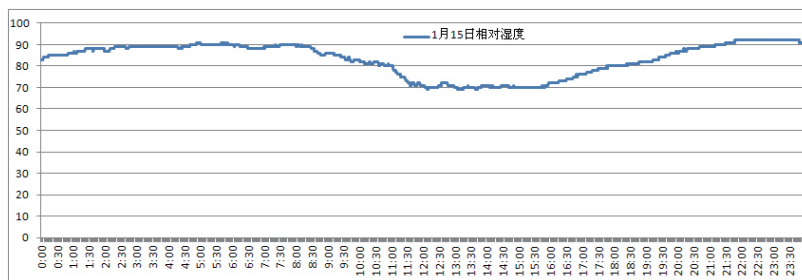
通过对比分析,毫米波测云仪在中高层云的探测能力方面远优于两个激光云高仪,即便在较薄的卷云方面,也能够很好地给出云体结构信息。

(4) 低能见度下探测能力分析

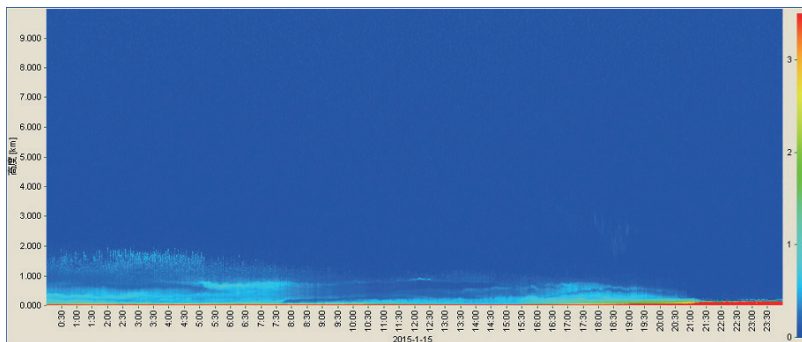
在能见度较低情况下,激光能量由于受雾、霾粒子等衰减影响,激光云高仪数据获取能力较差。图1.3-40为2015年1月15日为雾转霾的天气过程,从多方面对天顶云状况进行对比分析。



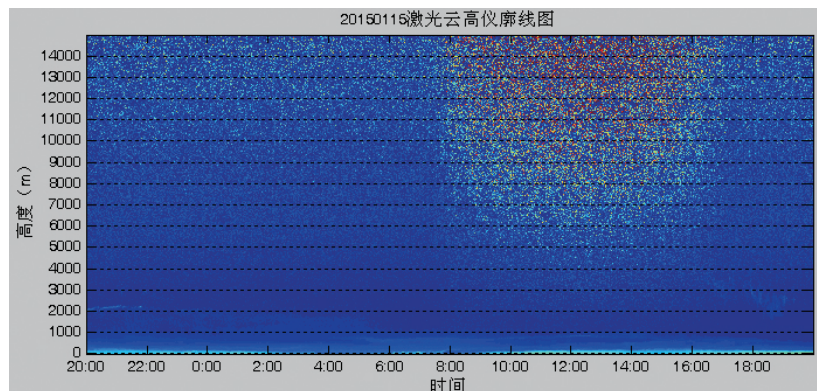
(a)



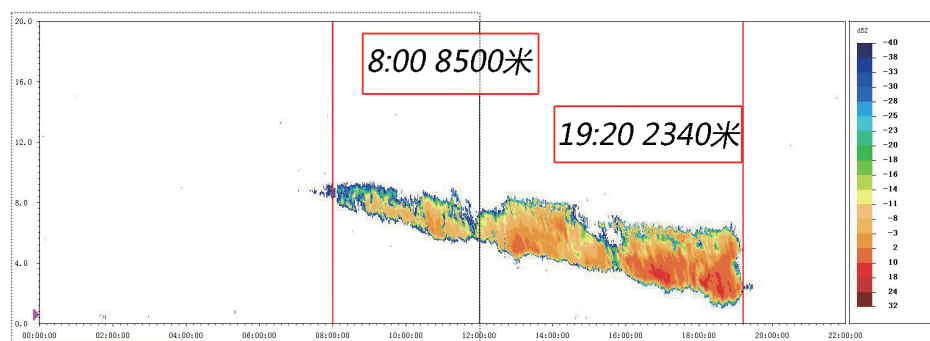
(b)



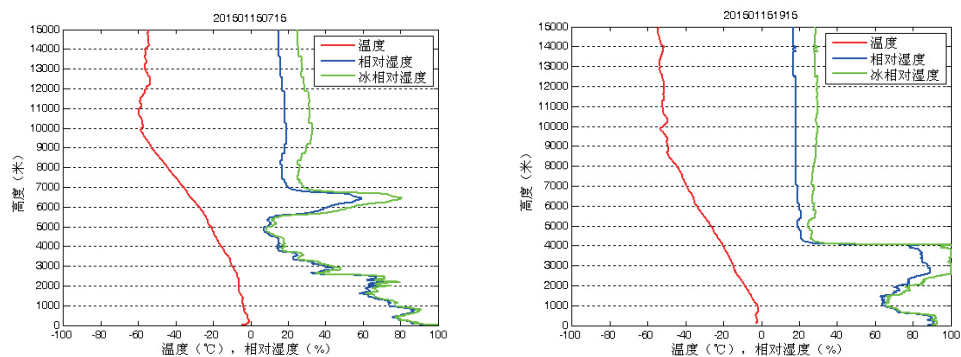
(c)



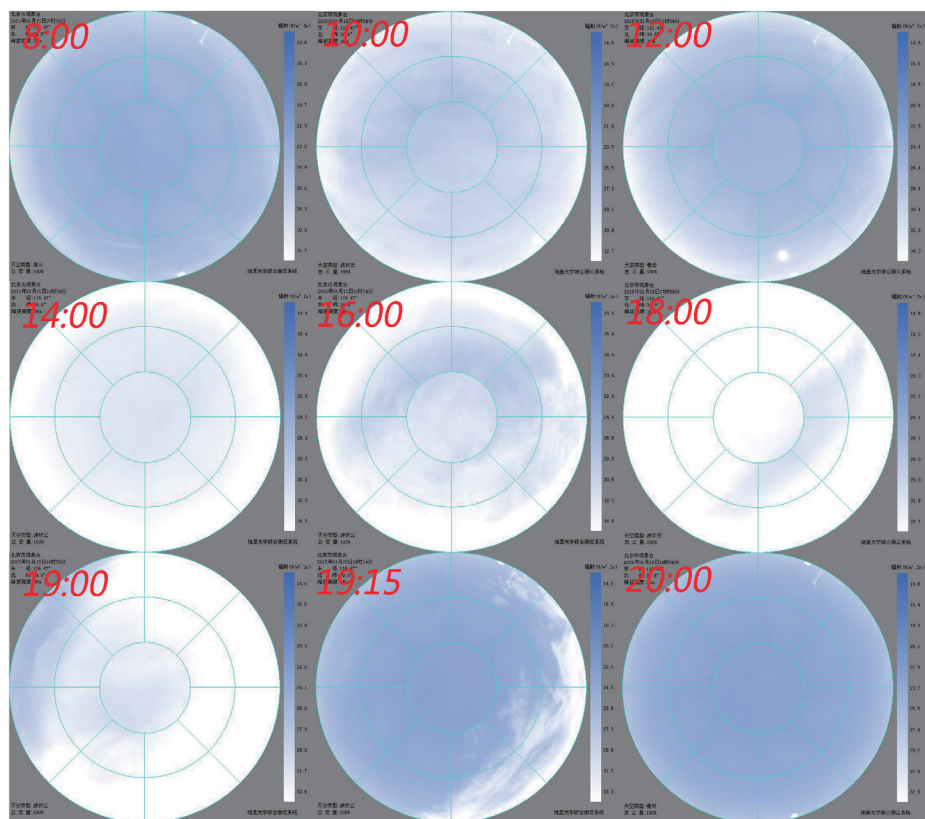
(d)



(e)



(f)



(g)

图1.3-40 2015年1月15日 (a) 自动站分钟能见度 (b) 自动站相对湿度 (c) CYY-2B激光云高仪云高走势 (d) HY-CL51激光云高仪云高走势 (e) 毫米波测云仪反射率 (f) 每天早晚两次探空廓线数据 (g) 全天天空近红外云图

通过分析,发现2015年1月15日在为雾霾天气,能见度在1000m以下,全天平均相对湿度83%,从图(g)中的近红外图像中可以看到天空确实有云层存在,且云层随着时间有变低加厚现象,2个激光云高仪全天没有探测到云层。在7:15探空温湿廓线中,6500m左右高空有湿度突变层(最大相对湿度81%),但没有达到云体判别阈值(88%),从毫米波测云仪反射率回波中看到在8:00之后在8500m左右开始有高层卷云生成,与探空廓线和近红外云图对应一致。

在19:00-20:00时间段内从近红外云图中看到从较厚云层开始消散,与毫米波测云仪在此时的云反射率情况对应一致(有云数据截止到19:20)。从19:15探空廓线中看出云层在2368m-4042m,对应时刻毫米波测云仪云体为2340m-6000m。对于云顶高探测误差可以做如下解释,在放球时刻云逐渐向东南移动,且在20分钟内移动出观测点上空,在4千米高空探空气球距离放球地点水平距离为1万多米,由于探空气球水平移动速度没有云层移动速度快,探空气球还没有达到云顶时刻已经移出云的边界,通过其相对湿度骤变也可以证实。

(5) 小节

通过对不同天气条件下3台云自动观测设备的探测能力进行分析,可以得出如下结论:

- ①毫米波测云仪相比激光云高仪具有穿透较厚云层探测多层云的能力。
- ②降水时刻激光云高仪数据获取能力变弱,在降雨时激光云高仪不能输出可靠的云观测数据,而毫米波测云仪在降水时能够给出整层云内部垂直反射率、云内粒子速度谱、液态水含量等信息,但目前不能识别云底高度。
- ③在卷云探测能力方面,毫米波测云仪数据获取率几乎达到100%,远高于激光云高仪。
- ④低能见度条件下,激光类观测设备由于受雾霾粒子散射的影响,很难穿透较厚雾霾获取上方云信息,而毫米波测云仪数据获取能力不受能见度等因素影响。

1.3.4 3台地基设备数据对比分析

(1) 各设备数据获取率情况分析

由于探空样本较少,为了更好地统计CYY-2B激光云高仪、HY-CL51激光云高仪、毫米波测云仪数据获取情况,本报告对3台地基测云仪器2015年1-5月份每天整点时刻所对应的样本数据与对应时刻云量(无锡双波段云量观测仪数据结果)和能见度进行获取率和相关性方面分析。

样本数据时间为自2015年1月1日至2015年5月31日(除去2月春节假期)连续观测138天。为使数据更具有说服力,只统计云量不小于7成的整点样本数据,数据对比分析期间总共有云样本数1188个,其中CYY-2B激光云高仪获取的有效样本总量为507个,HY-CL51激光云高仪获取有效样本总量为895个,毫米波测云仪获取到有云样本数为1053个。3台设备在能见度小于1km情况下有云样本数为31个,能见度在1-5km之间有云样本数为405个,能见度在5-10km之间有云样



本数为312个，能见度在10km以上情况下有云样本数为440个。3台测云设备不同能见度条件下数据获取率见表1.3-19。

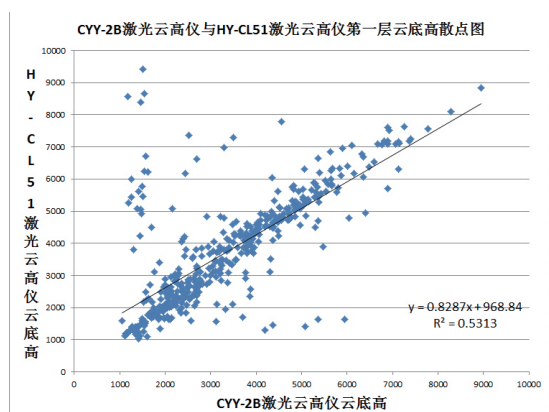
表1.3-19 3种测云设备数据获取能力对比

设备名称	总数据获取率	能见度<1km	能见度1km-5km	能见度5km-10km	能见度>10km
HY-CL51激光云高仪	75.3%	38.7%	69.6%	72.8%	85.0%
毫米波测云仪	95.0%	96.7%	94.1%	97.1%	94.1%
CYY-2B激光云高仪	42.6%	25.8%	39.8%	33.7%	53.0%

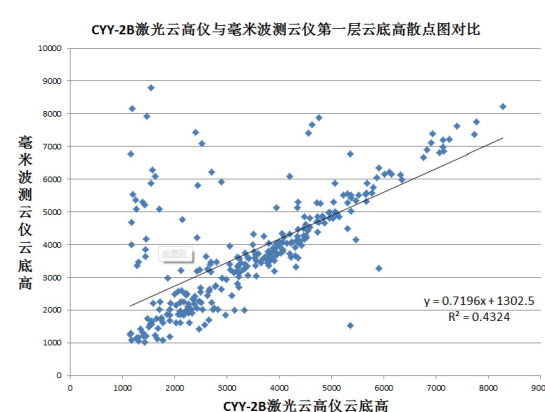
通过统计分析，毫米波测云仪整体数据获取率最高，HY-CL51激光云高仪次之，CYY-2B激光云高仪最低。从表1.3-19中可看出在所有能见度阶段，毫米波测云仪的数据获取率均明显高于2个激光云高仪，且数据获取能力不受能见度条件的影响；2个激光云高仪在不同能见度条件下数据获取能力则有所不同，在低能见度条件下，2个激光云高仪相比于各自整体数据获取率明显偏低，说明激光云高仪在低能见度条件下数据获取能力较差，原因是低能见度时刻一般伴随雾、霾天气，空气中存在大量水汽和气溶胶颗粒，对激光能量有很强的衰减作用，导致激光很少或无法穿透近地雾霾层到达云层，而随着能见度增大，2个激光云高仪数据获取能力有所改善，在能见度>10Km时达到最大值，说明激光云高仪数据获取能力易受能见度高低影响。

(2) 各设备数据相关性分析

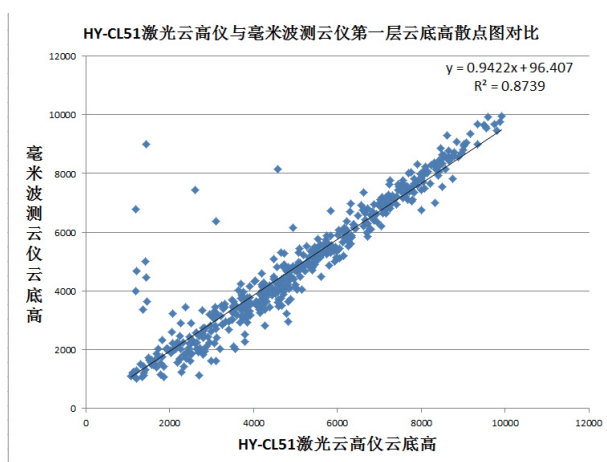
本小节对3台测云设备观测样本之间的相关性进行统计分析，首先对两两同时观测到云的样本进行散点图统计，然后对3台设备都探测到云的数据进行散点图统计。



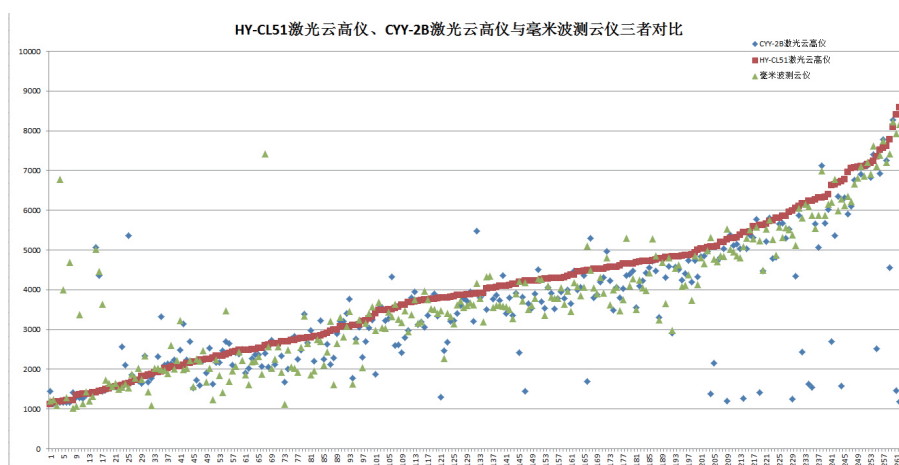
(a)



(b)



(c)



(d)

图1.3-41 CYY-2B激光云高仪、HY-CL51激光云高仪、毫米波测云仪有云样本散点图

从图1.3-41(a)中看到CYY-2B激光云高仪与HY-CL51激光云高仪的数据匹配较差，相关性为0.5313,图(b)中显示CYY-2B激光云高仪与毫米波测云仪的数据匹配性较低，相关性只有0.4324，从图(c)中可见毫米波测云仪与HY-CL51激光云高仪相关性较好，相关系数达到了0.8739，只有少数样本数据不匹配，主要是因为毫米波测云仪没有测到低云，而HY-CL51激光云高仪测到了低厚云，由于在低云中衰减很大而没有测到高云。图(d)是以HY-CL51激光云高仪为基准点的3者对比散点图，可以看到毫米波测云仪在高云段与HY-CL51激光云高仪匹配较好，而CYY-2B激光云高仪与HY-CL51激光云高仪在低云段匹配要好于高云段，整体上毫米波测云仪与HY-CL51激光云高仪的匹配结果优于CYY-2B激光云高仪。

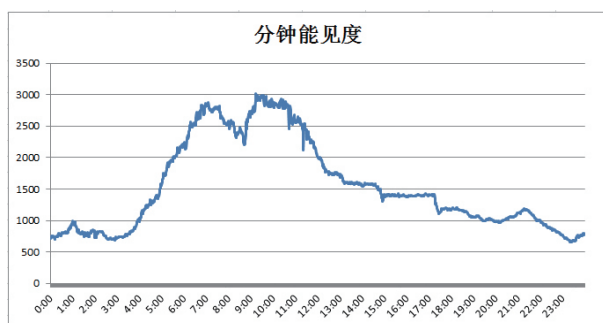
由于毫米波测云仪与HY-CL51激光云高仪相关性较好，本报告主要对毫米波测云仪与HY-CL51激光云高仪的对比结果进行分析。表1.3-20为毫米波测云仪与HY-CL51激光云高仪对比相差较大(低云与高云)的样本统计(部分时间全天空近红外无数据，表中没有列出)。



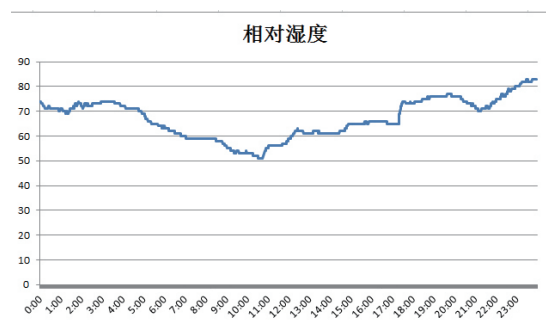
表1.3-20 HY-CL51激光云高仪与毫米波测云仪部分不匹配样本

时间	HY-CL51激光云高仪 云底高(m)	毫米波测云仪云底高 (m)	CYY-2B激光云高仪 云底高 (m)
1月14日4-6时	1190,1210,1200	6772,4683,3990	1160,1170,1170
1月18日2时	3100	1620	1710
4月1日19时	2800	1852	2200
4月4日3时、5时	2600, 1450	7426, 4458	2400, 4360
4月12日8时	2340	1417	2460

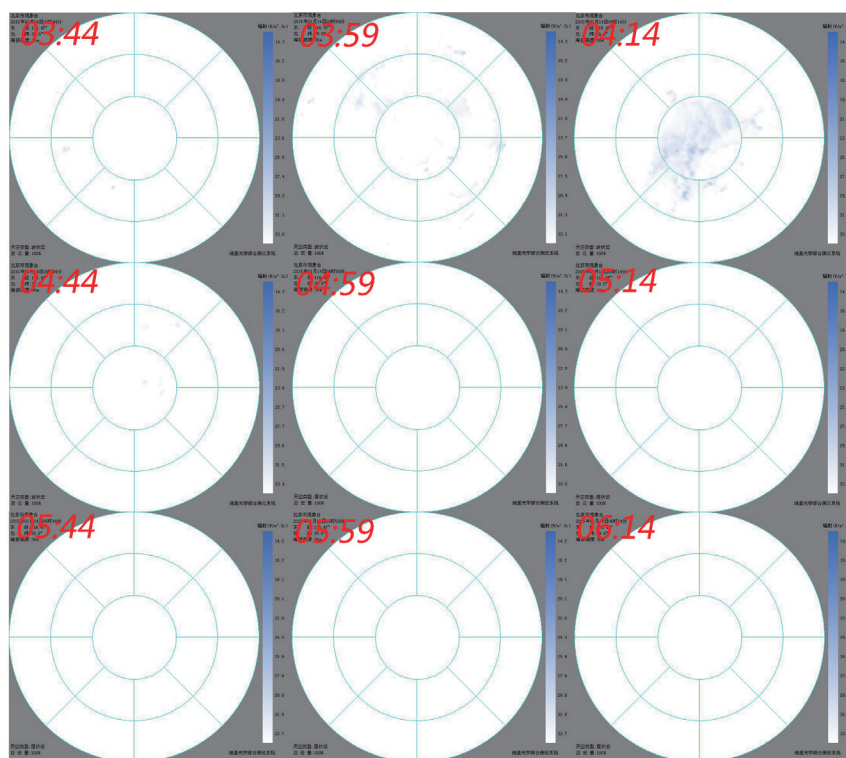
① 1月14日误差分析:



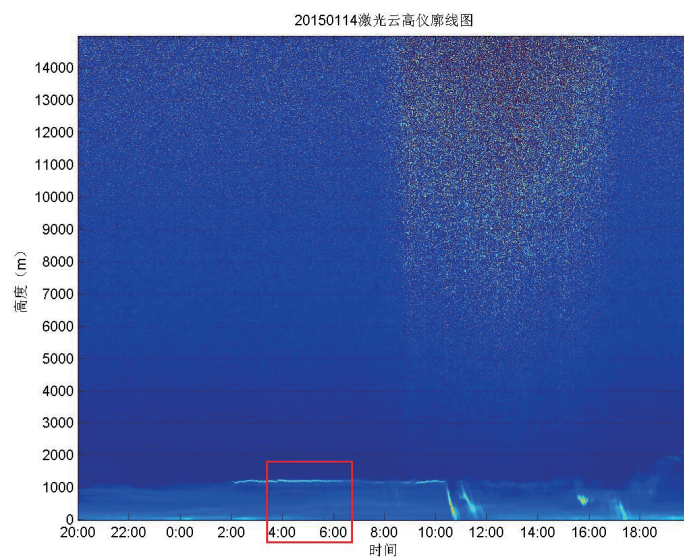
(a)



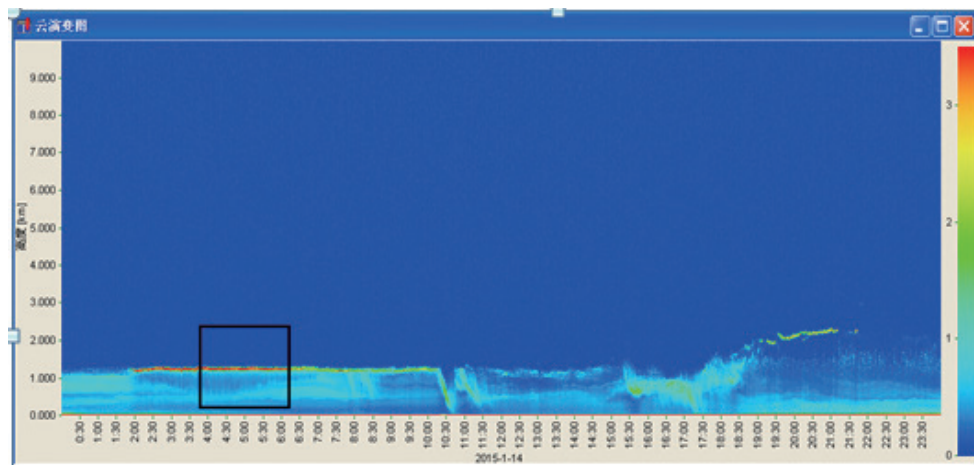
(b)



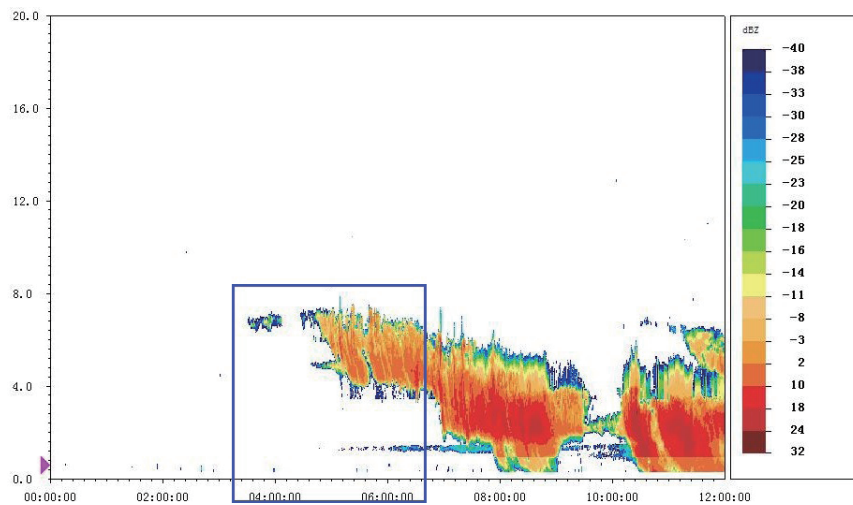
(c)



(d)



(e)



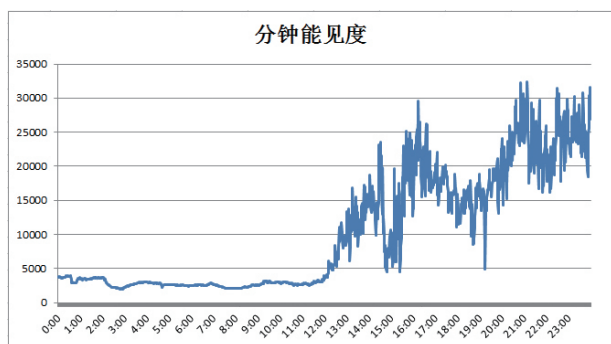
(f)

图1.3-42 2015年1月14日(a)分钟能见度(b)分钟相对湿度(c)全天空近红外图
(d)HY-CL51激光云高仪云演变图(e) CYY-2B激光云高仪云演变图(f)毫米波测云仪反射率图

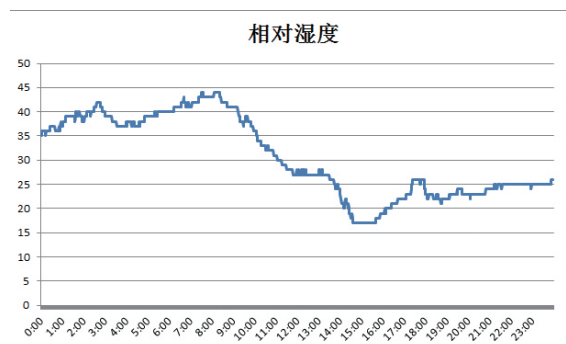


从图1.3-42(a)可知在4-6时能见度不超过2km, 图(b)中显示4-6时空气相对湿度较大, 均超过60%, 根据《中华人民共和国气象行业标准QX/T113-2010》(以下简称行标), 判定为重度霾, 图(c)中全天空近红外图像在4-6时有云, 纹理明显。HY-CL51激光云高仪、CYY-2B激光云高仪的云演变图中发现在1000m及以下区域回波强度较强, 且顶部非常平稳, 因此断定为霾层, 2个激光云高仪探测的云高为霾而非云底。图(f)中显示毫米波测云仪在此时间段的云底高度在4000m以上, 毫米波测云仪数据准确。

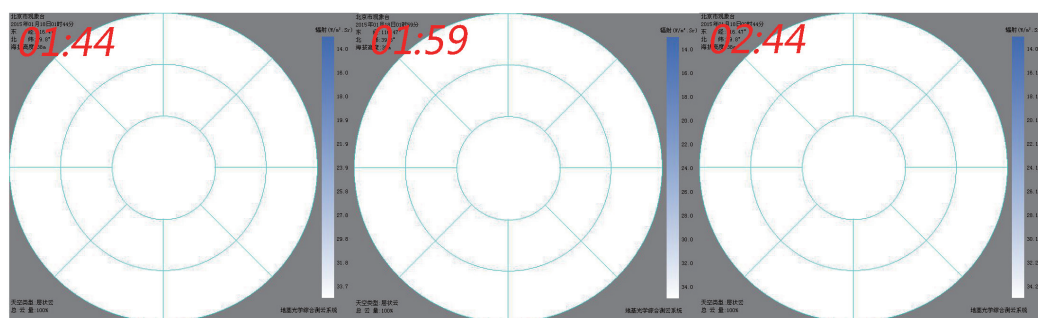
② 1月18日误差分析:



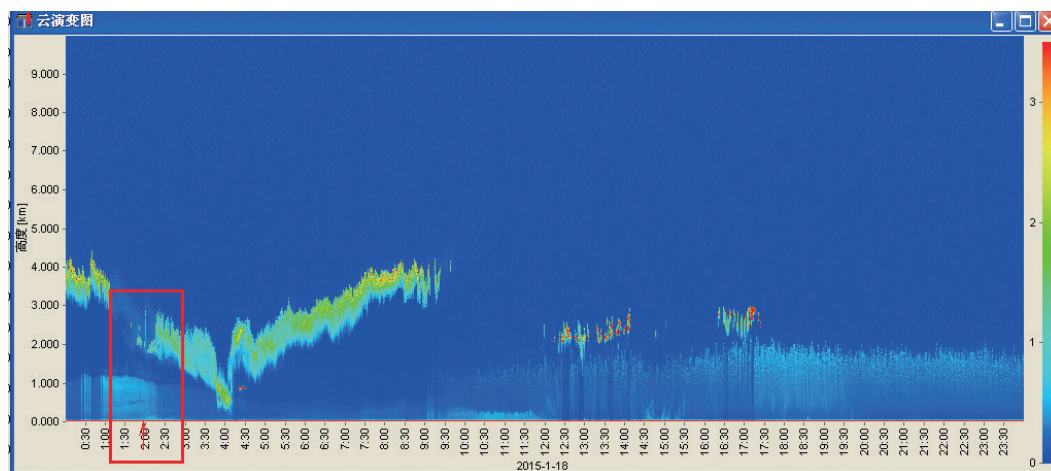
(a)



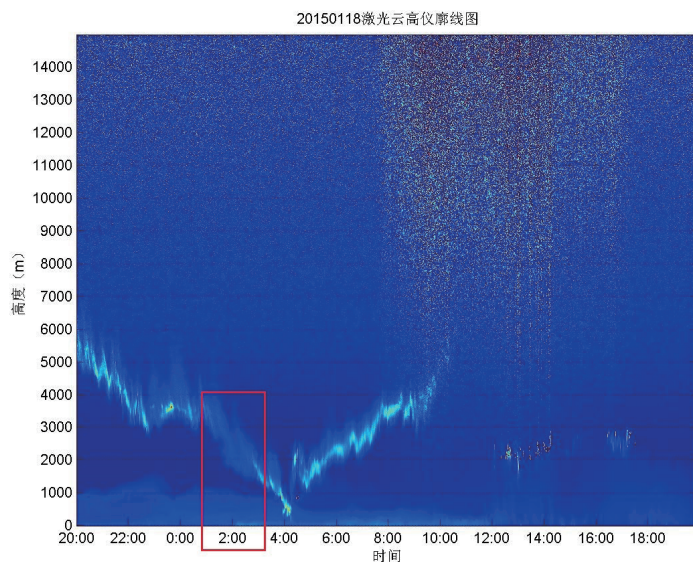
(b)



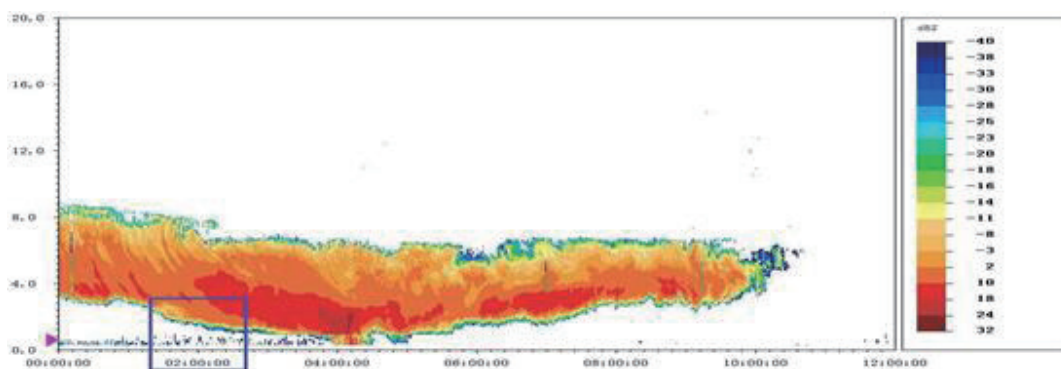
(c)



(d)



(e)



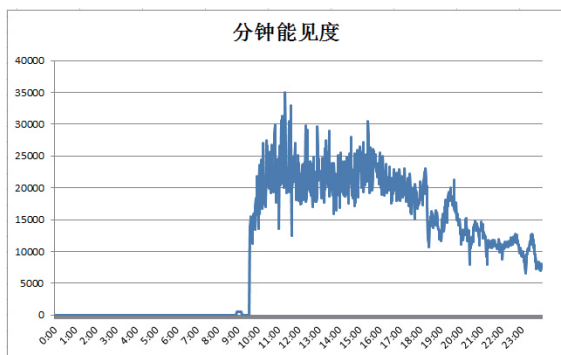
(f)

图1.3-43 2015年1月18日(a)分钟能见度(b)分钟相对湿度(c)全天空近红外图
(d)CYY-2B激光云高仪云演变图(e)HY-CL51激光云高仪云演变图(f)毫米波测云仪反射率

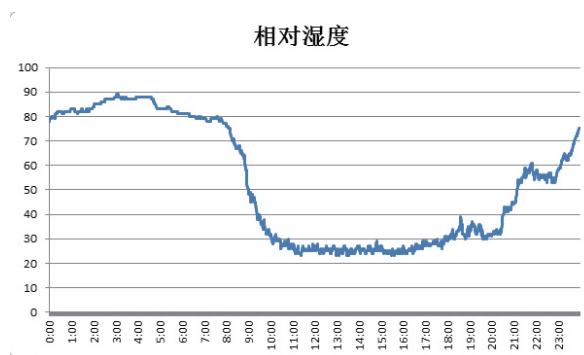
从图1.3-43(a)中可见在2点左右能见度5km以下，图(b)显示2点左右的相对湿度在35%-40%之间，根据行标判定天气为轻度霾，图(c)中显示明显存在低云层，CYY-2B激光云高仪与毫米波测云仪在2点附近云底高较低，都在2000m以下，(c)中HY-CL51激光云高仪云高在3100m，与前两者虽有一定相差但并不是很明显，2台激光云高仪测得云底轮廓及走势与毫米波测云仪一致，但云底不明显，而毫米波测云仪云体反射率界限非常明显，因此判定毫米波测云仪可信度较高。



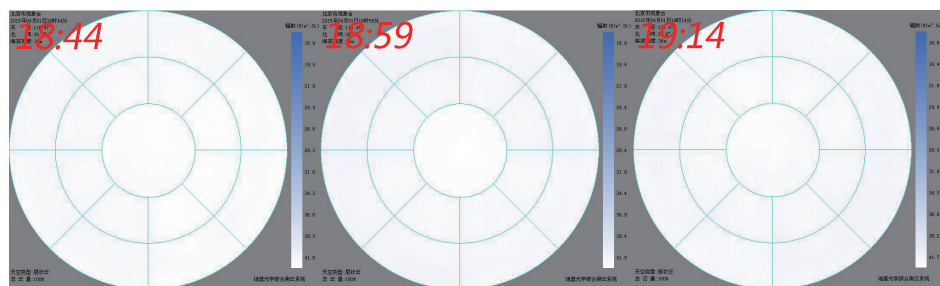
③ 4月1日误差分析:



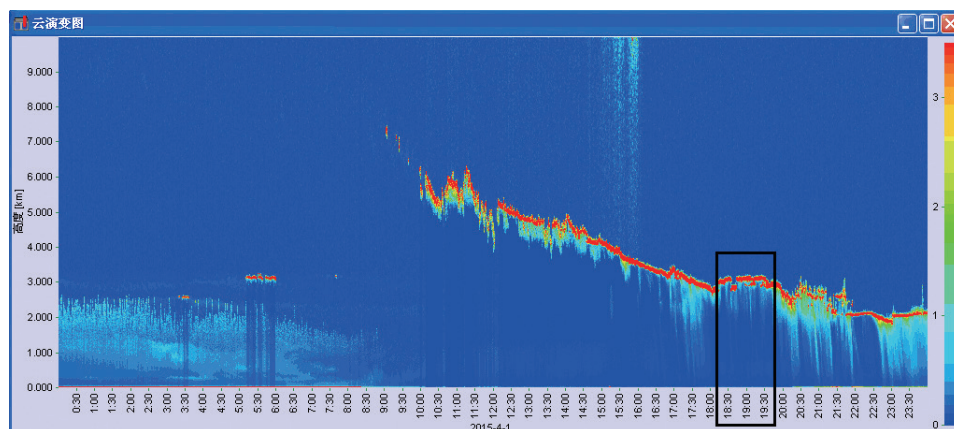
(a)



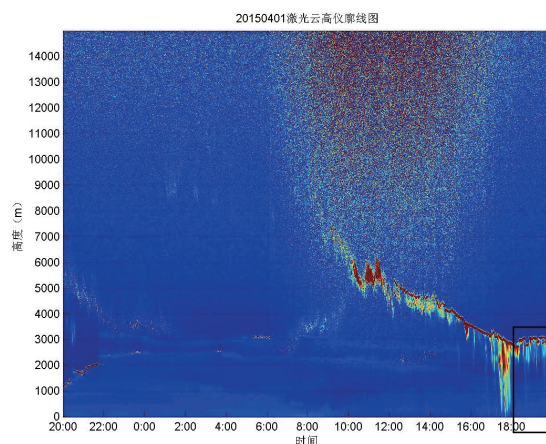
(b)



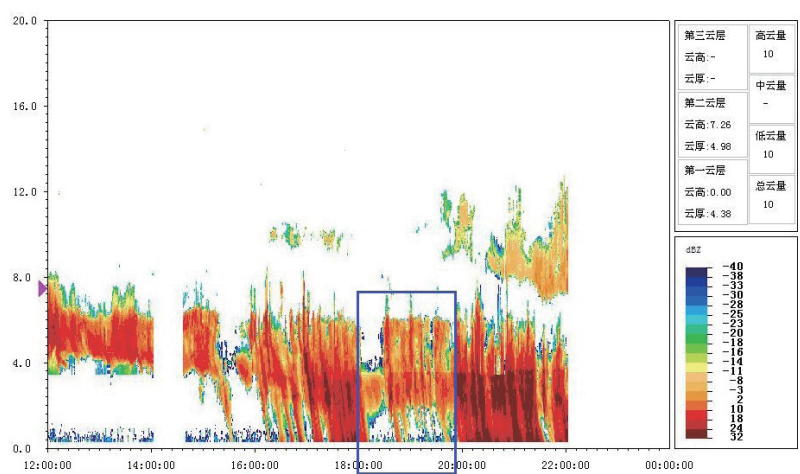
(c)



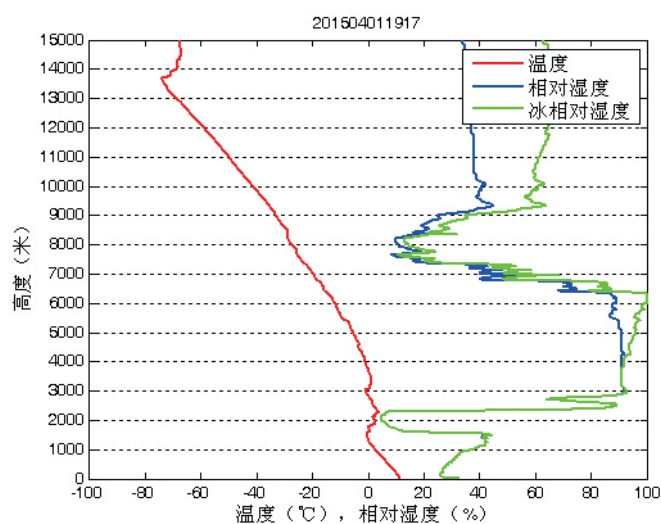
(d)



(e)



(f)



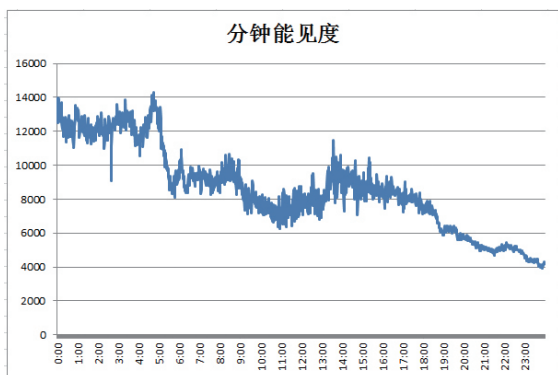
(g)

图1.3-44 2015年4月1日(a)分钟能见度(b)分钟相对湿度(c)全天空近红外图像
(d)CYY-2B激光云高仪云演变图(e)HY-CL51激光云高仪云演变图(f)毫米波测云仪反射率图(g) 19时17分探空温湿度廓线

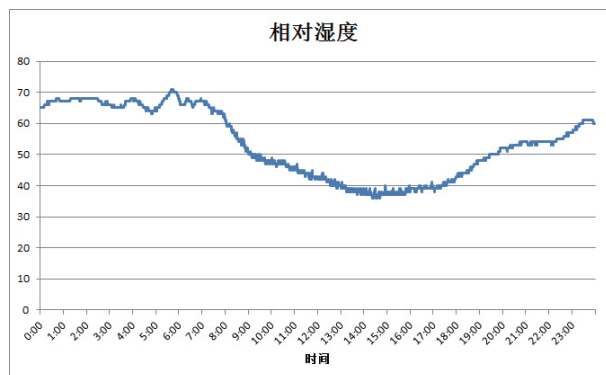
4月1日19时HY-CL51激光云高仪与毫米波测云仪的云底高分别是2800m与1852m，从图1.3-44(a)(b)中可见19时能见度大于10km，相对湿度较小，根据行标判定19时附近无天气现象，图(c)可见19时附近存有低层云，引入该日19时探空数据图(g)作为参考，确定云底高度2441m，与HY-CL51激光云高仪更为接近，所以该时刻HY-CL51激光云高仪较毫米波测云仪更为准确。



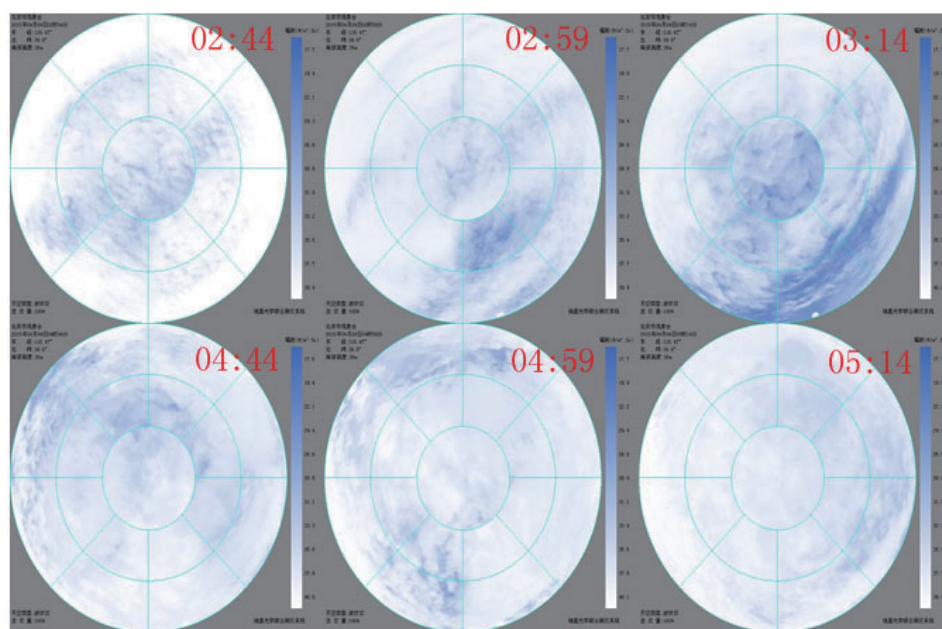
④ 4月4日误差分析:



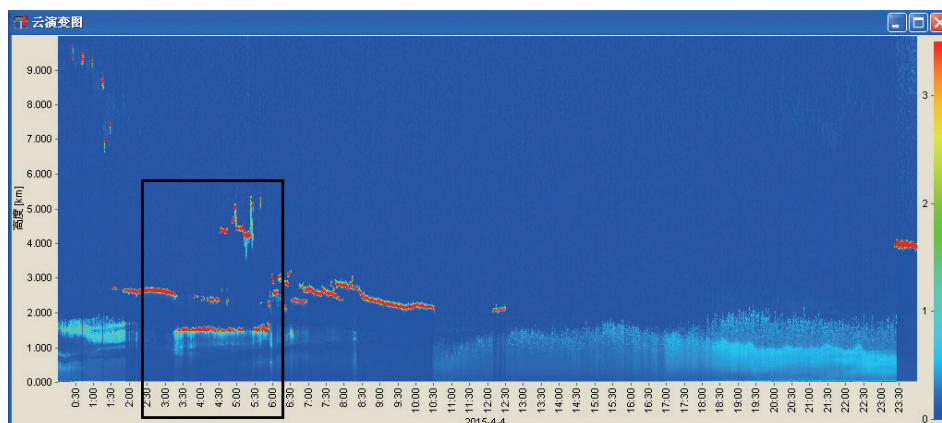
(a)



(b)



(c)



(d)

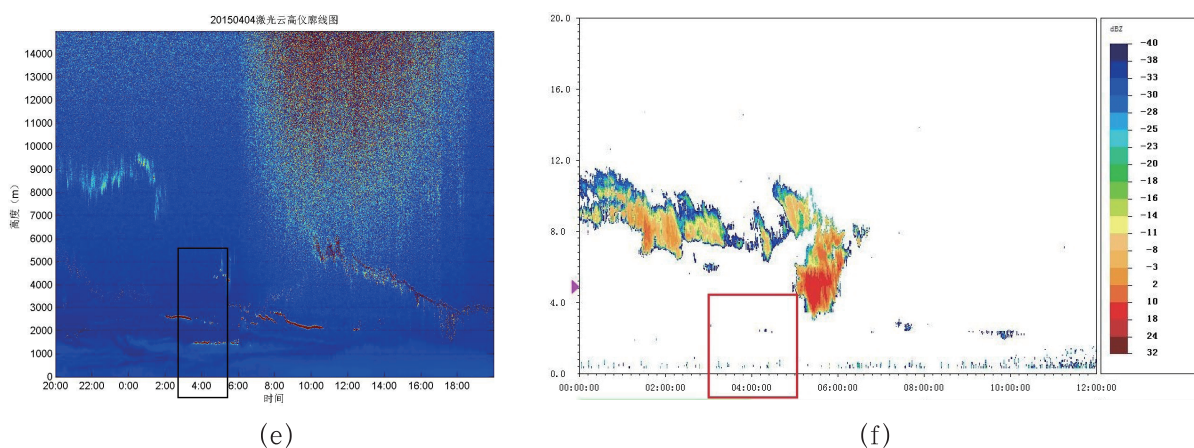
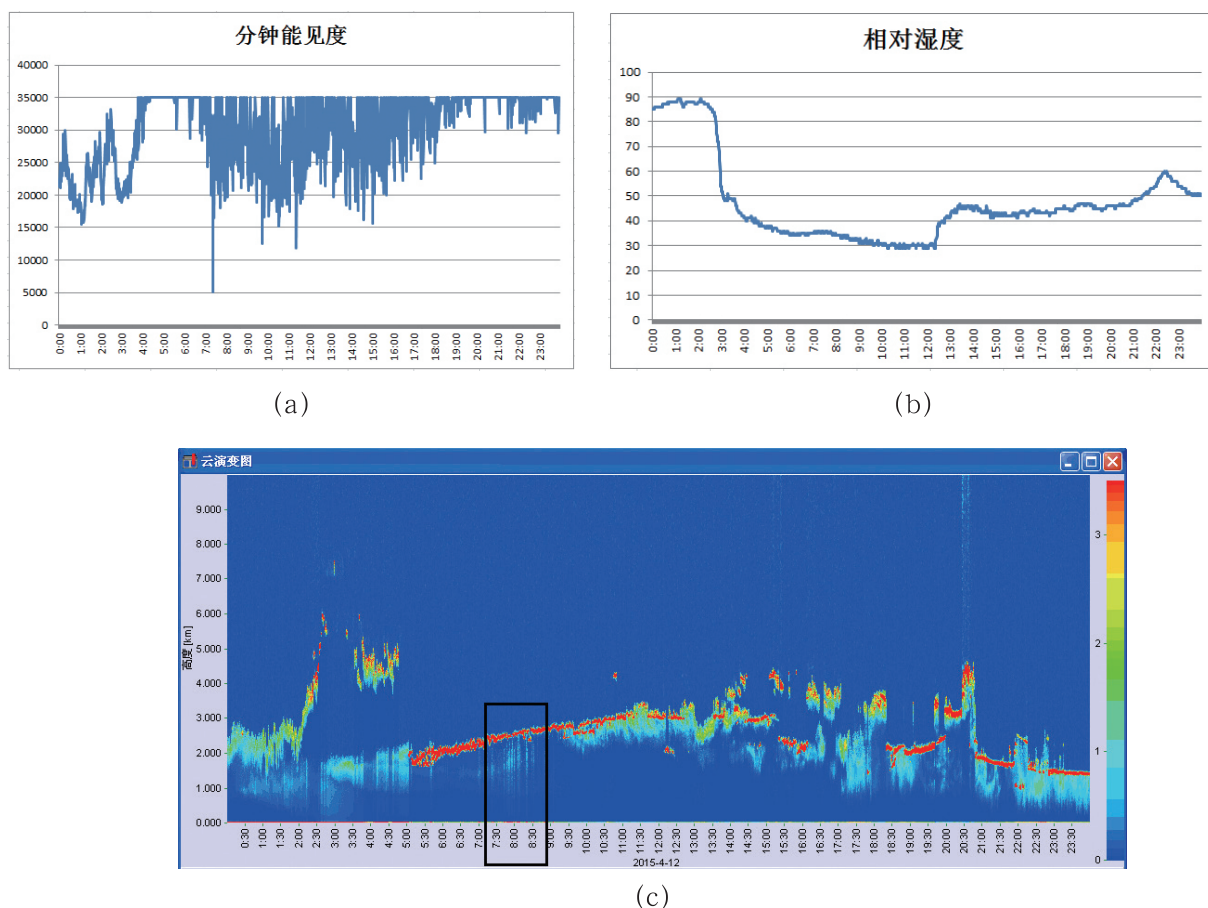
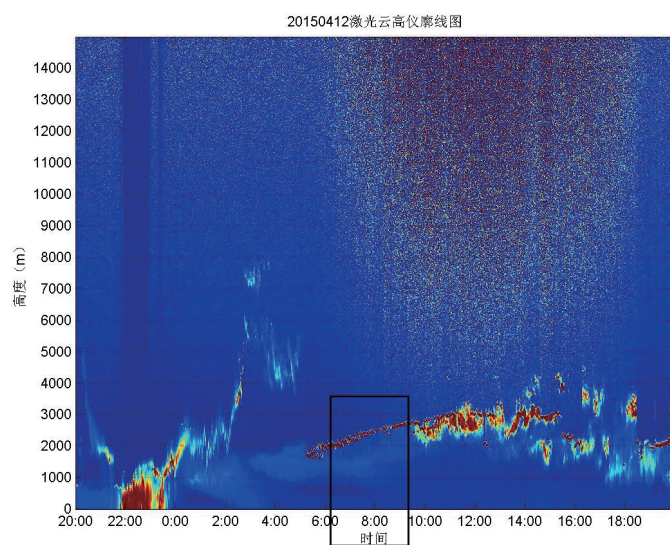


图1.3-45 2015年4月4日(a)分钟能见度(b)分钟相对湿度(c)全天空近红外图(d)HY-CL51激光云高仪廓线图(e)CYY-2B激光云高仪云演变图(f)毫米波测云仪反射率图

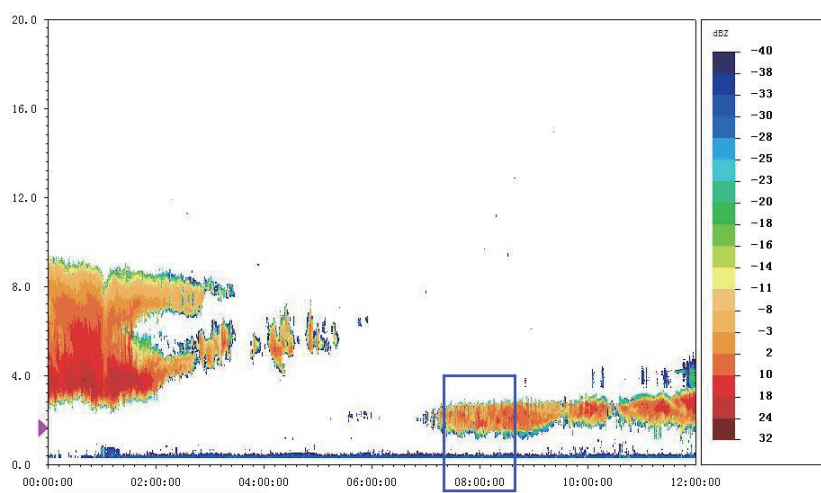
从图1.3-45(a)(b)可见在3-5点时间段能见度较高，相对湿度在60%-70%之间，图(c)中可见天空存有较薄云层。而从图(d)(e)看见2台激光云高仪在3-6点测到云层均匀无起伏，与近红外云图不对应，可初步断定为误判，而毫米波测云仪探测正确。3台设备在0-2点、6点时刻均测到准确的中高层云，且与近红外云图对应。

⑤ 4月12日误差分析：

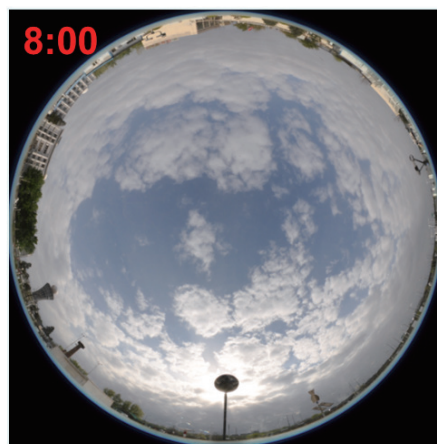
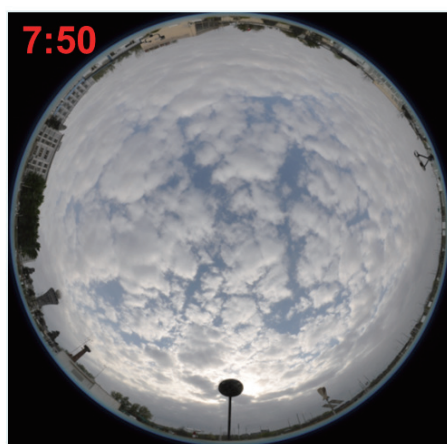




(d)



(e)



(f)

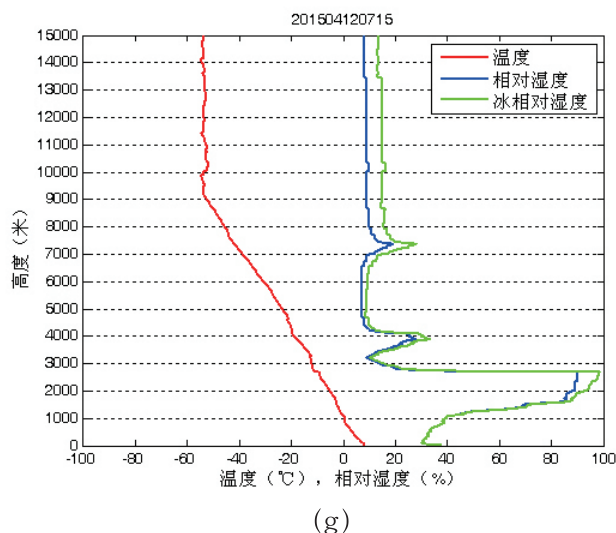


图1.3-46 2015年4月12日(a)分钟能见度 (b)分钟相对湿度 (c)CYY-2B激光云高仪云演变图 (d)HY-CL51激光云高仪廓线图 (e)毫米波测云仪反射率图 (f)全天天空可见光云图 (g)7时15分探空温湿度廓线

4月12日8时无全天空近红外数据，从图1.3-46(a)(b)中可见8时左右能见度高且相对湿度较低，不存在雾霾现象。HY-CL51激光云高仪、CYY-2B激光云高仪与毫米波测云仪在8时测得的云底高分别为2340m、2460m与1417m。2个激光云高仪匹配很好，毫米波测云仪与其他两者相差略大。引入7时15分的探空数据图作为参考，探空数据给出的云底高度是1626m，与毫米波测云仪更为接近。在可见光云图中可知天顶为淡积云，10分钟之内天顶云层变化非常剧烈，因此初步断定3台测云设备探测数据均为正确，云高对应误差仅仅是3台设备安装地理稍微差别所致。

(3) 小结

- 通过对2015年1-5月份3台云自动观测设备整点数据进行对比分析，可得出如下结论：
- ①毫米波测云仪数据获取率远高于2个激光云高仪。
 - ②低能见度条件下，激光类测云设备受粒子散射影响，数据获取率较低，而毫米波测云仪探测能力不受能见度高低等因素影响。
 - ③毫米波测云仪与HY-CL51激光云高仪所测云高具有很好的相关性。

1.3.5 各设备可靠性对比分析

在可靠性方面，毫米波测云仪是一种固定指向天空的毫米波雷达，由于没有伺服机构，大大降低了系统功耗，进一步提高了系统的可靠性，随着固态发射技术的发展，能够在较低的直流电压下工作，无需调制器和灯丝预热，能瞬时开关机器且输出波形变化灵活、工作稳定，基于固态发射技术（其可靠性比真空器件发射机提高10-100倍）的毫米波测云仪，能够全天候不间断工作。中国气象局气象探测中心从2013年开始在试验基地进行对比观测试验，试验期间除



软件故障以外，没有出现较大的硬件故障，长时间开机运行，性能稳定。

CYY-2B激光云高仪、HY-CL51激光云高仪已经通过中国气象局气象探测中心的测试评估，平均无故障时间均达到3000h以上，并在业务中开始试点使用。

1.3.6 各设备业务运行成本对比分析

经过成本分析论证，毫米波测云仪价格在70万元/台左右，HY-CL51激光云高仪45万元/台左右，CYY-2B激光云高仪35万元/台左右。虽然毫米波测云仪成本高于激光云高仪，但由于免维护性和低故障率，预计毫米波测云仪实际业务运行成本不会高于激光云高仪。

1.4 地基观测数据与卫星资料融合试验

1.4.1 试验数据

卫星数据：试验中所使用的卫星数据为FY_2G、FY_2E红外通道等经纬度投影5KM分辨率图像产品，时间分辨率为30分钟。

毫米波测云仪数据：试验中所使用的数据分别来自布设在中国气象局大气探测试验基地、朝阳区气象局、延庆区气象局的毫米波测云仪数据产品，即云底高（CBH）、云顶高（CTH）和反射率（Z），时间分辨率1分钟。3台毫米波测云仪的位置分布如图1.4-1所示。

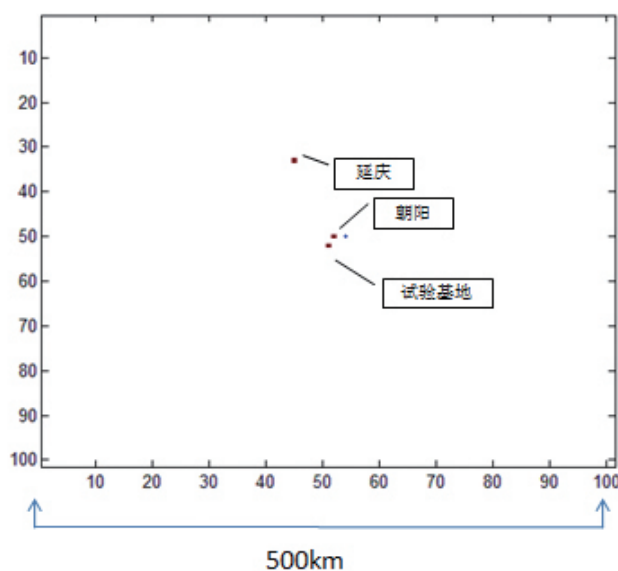


图1.4-1 北京地区毫米波测云仪分布

1.4.2 融合方法

根据中国气象局卫星气象中心发布的《卫星产品分发格式规范2.1版》，分别读取FY_2G气象卫星整点时刻和FY_2E气象卫星半点时刻的红外亮温数据。根据卫星图像产品中经纬度坐

标关系，以中国气象局大气探测试验基地经纬度坐标为中心，取500km范围的区域进行毫米波测云仪数据与卫星资料融合区域。卫星云图上某一点向上的辐射强度可以表示为：

$$I_{\lambda,\infty}^{\uparrow} = I_{\lambda,0}^{\uparrow} e^{-\int_0^{\infty} \alpha_a \sec\theta dH} + \int_0^{\infty} \alpha B_{\lambda} e^{-\int_H^{\infty} \alpha_a \sec\theta dH} \sec\theta dH$$

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_a & b > z > 0 \\ \alpha_a + \alpha_c & T \geq z \geq B \\ \alpha_a & z > T \end{cases} \quad (1)$$

其中 $I_{\lambda,\infty}^{\uparrow}$ 是卫星接收的辐射强度， $I_{\lambda,0}^{\uparrow}$ 是地面辐射强度，T是云顶高度，B是云底高度，H是高度， B_{λ} 是黑体辐射强度， α 吸收系数， θ 是辐射方向与天顶方向的夹角， α_a 是大气的吸收系数、 α_c 是云的吸收系数。从（1）式可以看出卫星云图表示的辐射强度与吸收系数有内在的联系。在云比较密实的情况下由于吸收系数比较大，可略去地表和大气的辐射作用，得到

$$I_{\lambda,\infty}^{\uparrow} = \int_B^T \alpha B_{\lambda} e^{-\int_z^{\infty} \alpha_a \sec\theta dz} \sec\theta dz \quad (2)$$

如果用毫米波测云仪反射率因子Z(H)来表示 α ，有 $\alpha = E'(Z(H))$ ，那么，（2）式变为：

$$I_{\lambda,\infty}^{\uparrow}(T, B, Z) = \int_B^T B_{\lambda} E'(Z(H)) e^{-\int_H^T \sec\theta E'(Z(H)) dH} dH \quad (3)$$

根据公式（3）就可以根据毫米波测云仪的探测资料计算出卫星云图在与毫米波测云仪对应点的辐射强度，同样通过这种内在的关系可以由卫星云图反演云顶高度、云底高度。

毫米波测云仪数据CBH数据为与卫星对应时刻的6分钟平均云底高度，CTH为与卫星对应时刻的6分钟平均云顶高度，若为多层云，则分别为底层云的6分钟平均云底高度和顶层云的6分钟平均云顶高度。Z的计算是先对6分钟内每分钟整层云的反射率进行平均(多层云之间的无云区域也进行计算)，再对6分钟进行平均得到该整点(半点)时刻的平均反射率。

将预处理完成的卫星亮温样本数据作为输入，毫米波测云仪观测数据作为输出，对已初始化的神经网络进行训练，建立卫星亮温与毫米波测云仪探测的云底高度、云顶高度和反射率等参数的神经网络，待新的卫星亮温实时数据输入已建立的神经网络，则可以输出所取区域里，每个亮温值对应的CBH、CTH、Z，流程如图1.4-2所示。

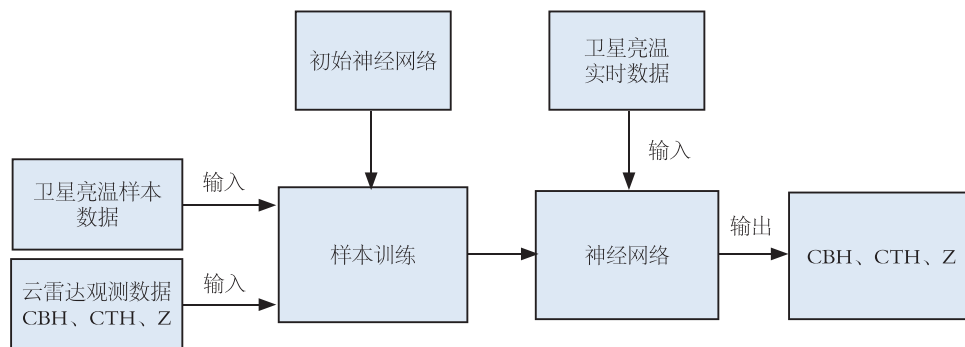


图1.4-2 毫米波测云仪数据与卫星资料融合流程图



1.4.3 试验结果

对2015年9月23日16:00至2015年9月24日04:00时刻的FY_2G、FY_2E卫星资料，以及中国气象局大气探测试验基地、朝阳区气象局的毫米波测云仪数据进行预处理，毫米波测云仪在本时间段的探测情况如图1.4-3，将预处理结果放入初始化的神经网络进行训练，将9月24日04:30时刻的卫星资料放入已经建立的神经网络，得到对应点的云底高度、云底高度和反射率，如图4-4所示。

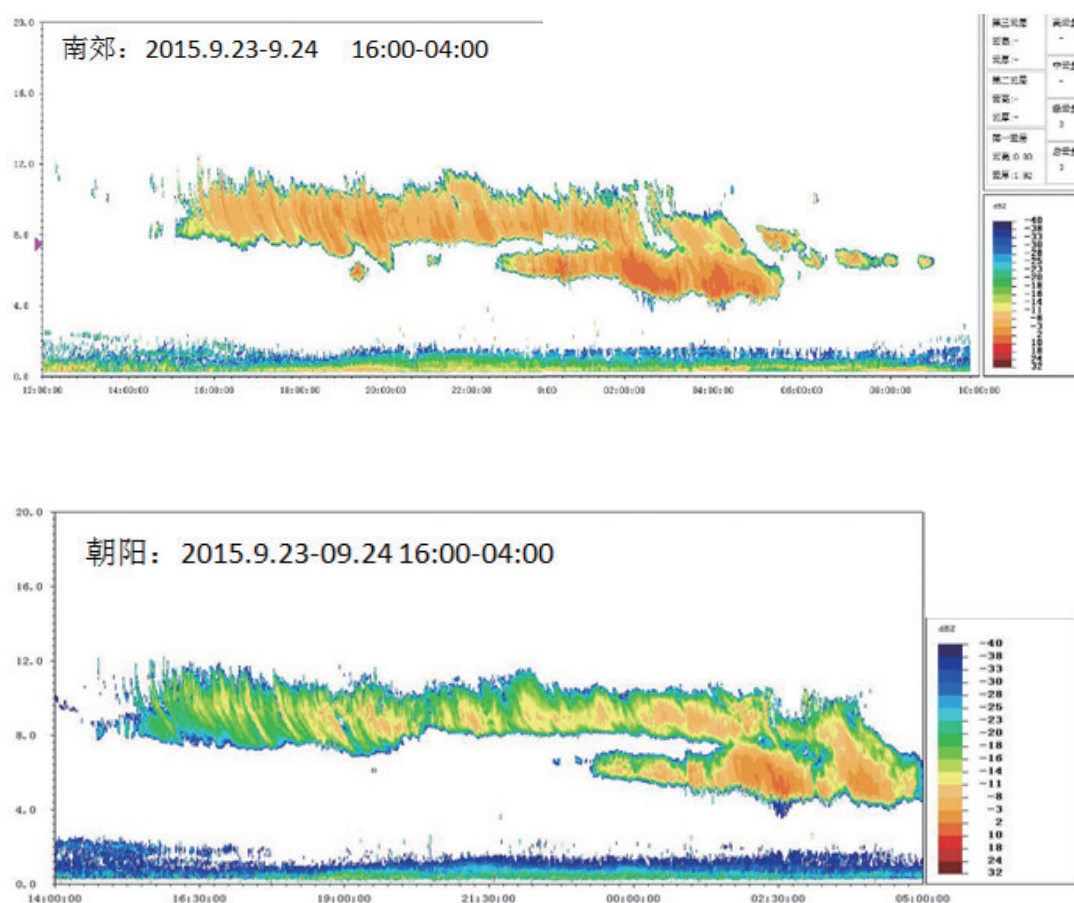


图1.4-3 南郊试验基地和朝阳区气象局毫米波测云仪探测情况

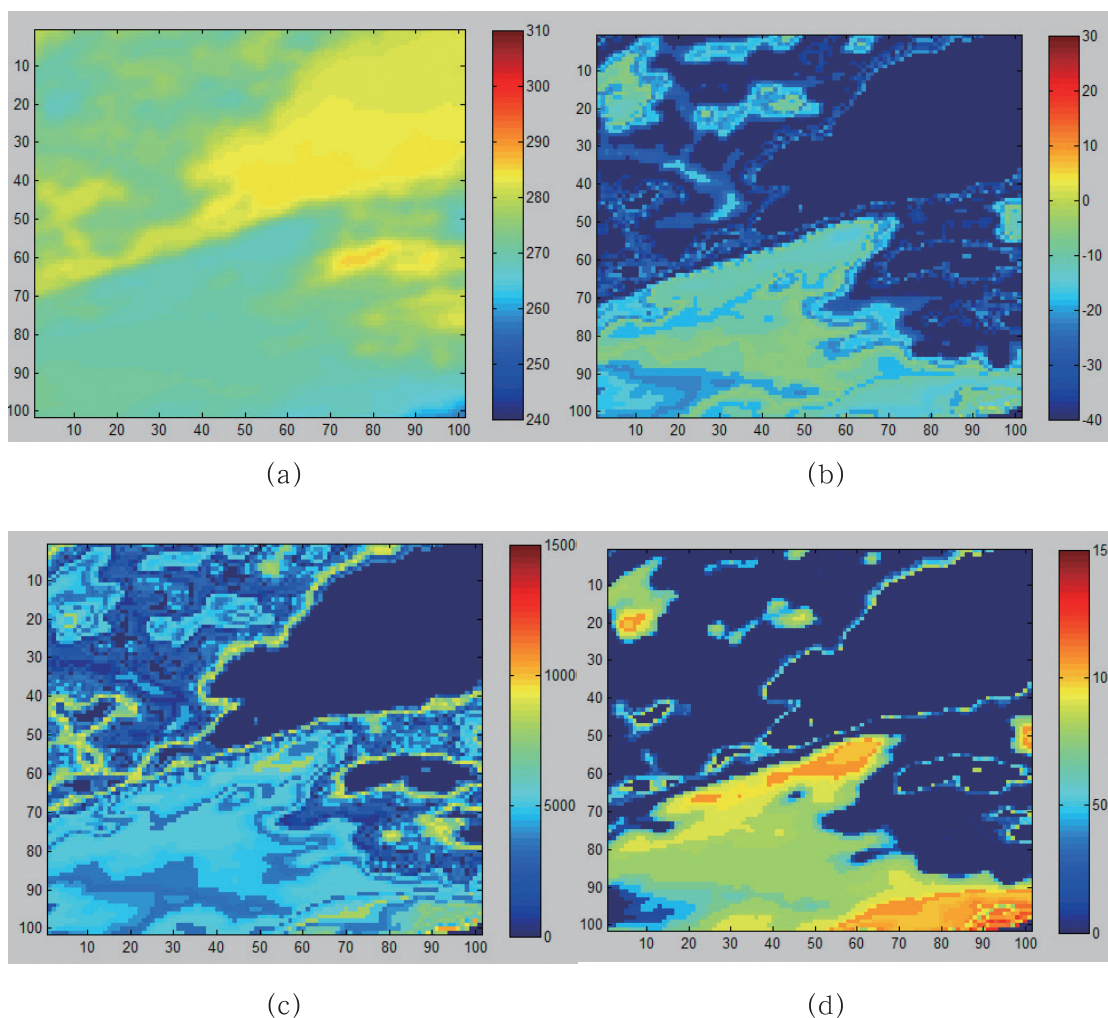


图1.4-4 根据卫星资料反演得到所取区域内的反射率、云底高度、云顶高度
(a) 所取区域的卫星亮温值；(b) 反演得到的反射率(Z)；(c) 反演得到的云底高度；
(d) 反演得到的云顶高度

1.4.4 小节

从前期的试验结果看出，将毫米波测云仪探测的云底高度、云顶高度、反射率数据与卫星遥感的亮温资料进行融合，方法的合理性得到检验，然而从反演的结果中也可以看出，反演的准确性还存在诸多问题，经分析有以下原因：（1）训练样本数据较少，毫米波测云仪布点数量少，无法构成一个很好的地基观测网；（2）反演的云层属于不同的云系，亮温与云底、云顶、反射率之间的函数关系不同，即应该建立不同的神经网络。

综上，毫米波测云仪探测数据与卫星遥感数据的融合工作有一定的理论基础，但需进行长期且多样化的试验工作。



1.5 试验结论

本报告重点分析了2015年1-5月份中国气象局气象大气探测试验基地运行的CYY-2B激光云高仪、HY-CL51激光云高仪、8毫米波测云仪在探测云的完整性（云底高、云顶高、云量、云体结构、云微物理特性）、准确性、天气适应性、可靠性、业务运行成本以及与卫星数据融合的可行性等方面进行了认真分析。通过对比分析得出如下结论：

（1）毫米波测云仪在云探测完整性方面优于激光云高仪，主要表现在毫米波测云仪能够获取云体结构、液态水含量、粒子速度谱等信息，对数值预报模式及人工影响天气具有重要参考意义。

（2）通过与探空温湿度廓线数据进行对比分析，毫米波测云仪云底高探测准确性最高，HY-CL51激光云高仪次之，CYY-2B激光云高仪探测云底高的准确性低于前两者。

（3）在探空数据对比分析和2015年1-5月份整点数据样本数据获取率分析中，毫米波测云仪数据获取率明显高于激光云高仪。

（4）激光云高仪云底高探测能力易受雾霾等气溶胶粒子影响，低能见度条件下数据获取率较低，而毫米波测云仪的探测能力与能见度高低没有明显相关性。

（5）在多层云、降水时刻、卷云等天气条件下，毫米波测云仪探测能力明显优于激光类观测设备。

（6）通过开展毫米波测云数据与卫星数据进行融合试验，初步证实地基与卫星遥感之间数据融合方式是可行的。

2 超声波测风传感器试验*

摘 要：本试验对超声波测风传感器业务化使用的可能性进行评估。从超声波测风传感器的技术原理入手，分析了超声波测风传感器与机械式测风传感器之间的区别，重点剖析了超声波测风传感器的误差来源。同时，以计算流体力学为依托，分析了阴影效应对超声波测风传感器的影响。之后，利用5台超声波测风传感器在实验室进行了测试，并于2014年5月22日至10月26日在外场进行了比对分析。资料分析表明：超声波测风传感器具有在业务上作为机械式测风传感器备件并替换其使用的可能性，超声波测风传感器（2维）的测试性能与机械式测风传感器具有可比性，且不受降雨天气的影响。

2.1 背景和目的

地面气象观测中测量的风是两维矢量（水平运动），用风向和风速表示。风向是指风的来向，以度（°）为单位。风速是指单位时间内空气移动的水平距离，以米/秒（m/s）为单位。风的平均量是指在规定时间段的平均值，有3秒钟、2分钟和10分钟的平均值。

气象观测业务中，测量风的仪器主要为单翼风向传感器和风杯风速传感器等。这种传统的机械式测风方法，应用历史悠久、使用普遍、有完善的理论基础和长序列的测量数据，是目前业务中主要使用的测量方法。但机械式测风传感器也存在一些明显的缺点，包括（1）需要一定的启动风速驱动，限制了测风的起始阈值及分辨力；（2）转动结构封装不严密，容易受到沙尘污染，增大摩擦，造成测量误差；（3）在寒冷潮湿天气下转动结构容易冻结，造成测试数据缺失；（4）风速和风向分别处理，导致了风速和风向测量在时间和空间上的不同步，特别是如果风向与风速传感器的启动风速不一致的话，将会造成错误的观测结果。

随着超声波测风技术的逐步完善，超声波测风传感器在不同领域实现气象观测已有了许多应用，如超声波测风传感器被应用于梯度塔上进行风的廓线观测，利用超声波测风传感器进行气体湍流的观测以及进行低空风切变的观测等。与机械式测风传感器相比，超声波测风传感器有以下优点：（1）反应速度快，不存在启动风速的要求；（2）测量精度高，随着电子技术的进步，高精度的定时装置被应用于超声波测风传感器中，使得很多超声波测风传感器的灵敏度可以达到 $\pm 0.015\text{m/s}$ ，在 60m/s 量程内，精度可以优于 $\pm 2\%\text{FS}$ ；（3）使用过程中不需进行频繁的校正。超声波测风传感器的测风精度与环境温度、湿度、气压没有直接关系，没有转动的机

*本报告执笔人：张明，李敏，雷勇，陈瑶



械结构，不易产生形变，工作状态稳定；（4）超声波测风传感器持续振动的工作特点使得它对沙尘及薄冰有一定的抵御能力。同时，由于没有可动结构，进行密闭封装比较容易，因此不易受沙尘及覆冰的影响。虽然机械式测风及超声测风都可以通过增加加热模块来减缓传感器的冻结，但超声波测风传感器结构简单，体积小，加热效果也优于机械式测风传感器。

一般认为超声波测风传感器的主要误差包括：（1）阴影效应；（2）全天候观测能力缺乏。通常情况下，3维超声波测风传感器在雨天条件下使用时，如果传感器上有水时就会改变其声波传播路径长度而使得测量值不可靠。但2维超声波测风传感器在降雨时的使用效果还有待进一步评估，这也是本试验的主要内容之一。同时，在试验中还进行了实验室测试，以数据为依据定量分析了阴影效应的影响，评估了超声波测风传感器的误差。

考虑到超声波测风传感器的诸多优点，在观测业务中推广应用超声波测风传感器进行风的自动观测，进而提升风的观测能力是非常有意义的。同时，所有进入地面业务观测的设备都应进行系统科学的测试评估，以明确其业务应用的可能性，特别是与传统仪器的可比性，对历史数据的影响等方面都要进行全面科学的分析评估。本试验正是基于这样的需求，从不同测风传感器的敏感原理出发，通过计算机仿真、实验室及外场测试等多个方面入手，整体评估超声波测风传感器的业务应用可能性，为实现超声波测风传感器的业务推广奠定技术基础。

2.2 传感器及工作原理

超声波测风传感器以超声波脉冲方式工作，按测风维数可分为：2维（2D）测风传感器、3维（3D）测风传感器，按探头数量可分为：3探头，4探头，5探头和8探头，如表2.2-1所示。本试验以满足地面2维观测为目的，选取2维超声波测风传感器作为观测设备。

表2.2-1 超声波测风传感器的分类

按维数分	按探头（传感器）数量分	按传感器分布方式分
2维（2D）、3维（3D）	3探头、4探头、5探头、8探头	正交式（90°） 非正交式（120°）

超声测风主要有3种原理：

（1）时差法

超声波在传播过程中，空气的流速叠加在声波之上，造成顺流和逆流传播的时间差，通过测量时差来计算风速。

（2）多普勒法

声波在传播过程中，发射信号在接触到障碍物时，会产生多普勒偏移，频率的偏移大小与

声波传播介质的速度有关，因此通过测量发送和接收时的频率差计算空气的传播速度。

(3) 涡街法

利用穿过空气的超声波束被漩涡发声体形成的漩涡调制的现象，通过从已调波检出漩涡频率的方法也可以用来测定介质流速。

涡旋的频率 f 与流体的流速 v 成正比，与涡旋发生体的正面宽度 d 成反比，可用公式表示为：

$$f = St \cdot v / d \quad (1)$$

其中， St 为斯特劳哈尔数，在正常工作条件下为常数。

涡街法有许多优点：可测量液体、气体和蒸汽的流量；精度可达 $\pm 1\%$ （指示值）；结构简单，无运动件，可靠、耐用；压电元件封装在发生体中，检测元件不接触介质；使用温度和压力范围宽，使用温度最高可达 400°C ；并具备自动调整功能，能用软件对管线噪声进行自动调整。

多普勒法和涡街法制造难度较高。一般超声波测风传感器均采用时差法制造，因此本文所讨论的对象均是以时差法测量原理的超声波测风传感器。

2.2.1 二维超声波测风传感器的工作原理

以图2.2-1所示超声波测风传感器为例。

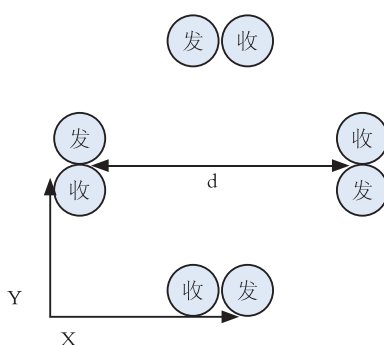


图2.2-1 超声波测风传感器示意图

在X、Y方向各布置收发两组超声探头，距离为 d ，超声波沿正向传播时间为 t_1 ，沿反向传播时间为 t_2 ，超声波波速为 c ， x 方向风速为 v_x ，则：

$$\frac{d}{t_1} = c + v_x \quad (2)$$

$$\frac{d}{t_2} = c - v_x \quad (3)$$



得出:

$$v_x = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \quad (4)$$

$$c = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_1} + \frac{1}{t_2} \right) \quad (5)$$

通过测量正向及反向的传播时间,可以计算x方向的风速及超声波波速。同理可计算y方向的风速 v_y 。

则风速 v , 风向 θ 为:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (6)$$

$$\theta = \arctan \frac{v_y}{v_x} \quad (7)$$

又由大气中的超声波波速为:

$$c = 20.067 \times \sqrt{(1 + 0.3192e/P)T} \quad (8)$$

其中, e 为水汽压, P 为大气压力(单位百帕), T 为绝对温度(单位开尔文)。由波速即可计算得出相应的温度值。

2.2.2 超声波测风传感器的主要误差分析

根据公式(4)可知,超声波测风主要的误差包含如下几个方面:

(1) 探头之间距离误差 Δd

这部分误差主要由支架的形变造成,假设收发探头之间的距离为10cm,若存在 $\Delta d=2\text{mm}$ 的误差,则风速测量误差将达到2%,因此 d 的校准必须非常精确。这类误差属系统误差,可以通过定期的校准修正。

(2) 计时误差 Δt

这部分误差主要由于超声波探头在接收和发送超声波时存在延迟效应,加上电路的延迟造成。

设计时误差为 Δt ,则:

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_1 + \Delta t} - \frac{1}{t_2 + \Delta t} \right) = \frac{d}{2} \left(\frac{t_2 - t_1}{(t_1 + \Delta t)(t_2 + \Delta t)} \right) \\ &= \frac{d}{2} \left(\frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2 + \Delta t(t_1 + t_2) + \Delta t^2} \right) \approx \frac{d}{2} \frac{t_2 - t_1}{t_1 t_2} = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

可以看出,考虑到 Δt 是 t 的高阶无穷小, Δt 对测风的影响基本可以忽略。

(3) 阴影效应

另外，阴影效应也是制约超声波测风传感器性能的主要问题。当风朝超声波探头背部吹来，背风一侧风速减小，迎风角越小阴影效应越明显。在理想状况下，阴影效应可以看作是在一小段距离内，风被完全阻挡，相当于d减小了。如图2.2-2所示。

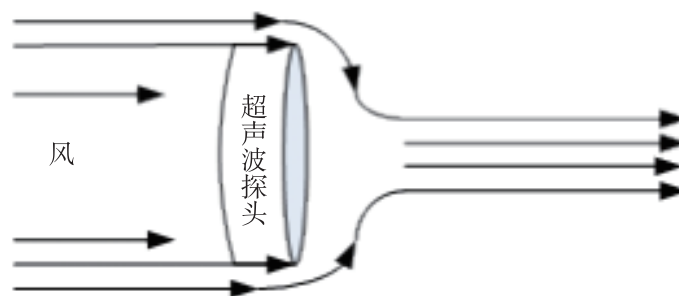


图2.2-2 阴影效应示意图

(4) 超声波传播引起的误差

超声波与普通声波一样，传播时存在衰减、吸收、散射、折射等。衰减一般成指数规律，即辐射随距离按公式（10）式衰减：

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (10)$$

式中，I为声强， I_0 为初始声强， α 为衰减系数，x为介质厚度。超声波在传播过程中，散射衰减系数和吸收衰减系数分别与频率的关系如下：

$$\alpha_s \propto f^4 \quad (11)$$

$$\alpha_a \propto f^2 \quad (12)$$

式中， α_s 与 α_a 分别为散射衰减和吸收衰减。

只要超声波在传播过程中的衰减程度不太大，导致接收探头无法识别，超声波传播过程就不会导致测量误差。但在超声波传感器的设计过程中，要考虑超声波频率对探测的影响，进行科学的设计。超声波频率越高，衰减越大，传播距离越短。要选择合适频率的超声探头，来避免过大的衰减误差，频率越高，电路所需要的晶振频率也越高，可以提升传感器分辨力，但会增加制造成本。频率越高，指向性越好，可以将探头尺寸做小，减小对原始风场的影响。

2.3 试验内容与分析

为了分析超声波测风传感器的业务应用可能性问题，本试验从3个方面研究了超声波测风传感器的性能。包括：（1）计算流体力学仿真实验（2）实验室测试（3）外场测试。



2.3.1 计算流体力学仿真分析

上一节中定性的描述了超声波测风传感器测量误差，为了更细致地分析阴影效应及温度变化对超声波测风传感器的测量产生的误差，设计了仿真计算机实验。本次实验基于计算流体力学技术，依托fluent计算机仿真软件，计算分析了超声波测风传感器的阴影效应及温度特性。测试原理框图如图2.3-1所示。

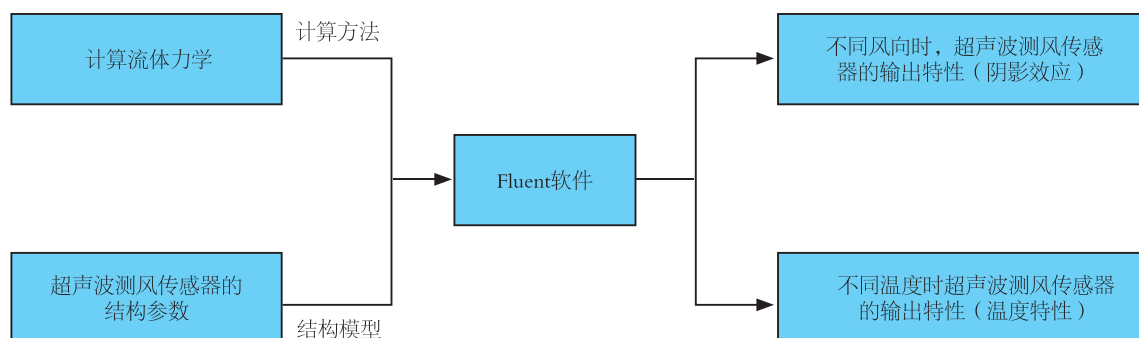


图2.3-1 ANSYS有限元仿真原理框图

\（1）阴影效应仿真测试

为了进行计算流体力学仿真，首先需要对传感器结构进行建模。以正在南郊观测场进行外场试验的天津气象仪器厂超声波测风传感器为原型，进行结构建模，其尺寸结构如图2.3-2所示。在ANSYS运行环境中建模结果如图2.3-3所示。

阴影效应如图2.3-4所示。从图中可知，当风以平行于X轴方向运动时，在超声波的传播路径上，风速会受到传感器遮挡，造成测量值偏低，当风以与X轴方向成 45° 角运动时，在超声波传播路径上也会受到影响，但比水平方向要小。即验证了阴影效应对平行于超声波传播方向的风场影响更大这一结论。图2.3-5和图2.3-6是在超声波传播路径上风速的分布图。其中位置0表示结构的中心位置。

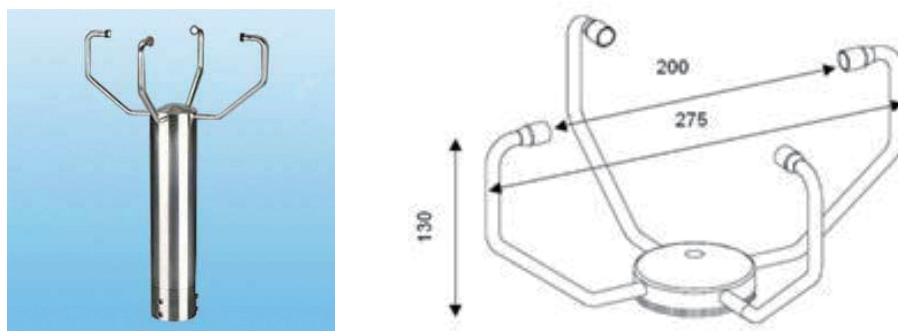


图2.3-2 超声波测风传感器的结构尺寸

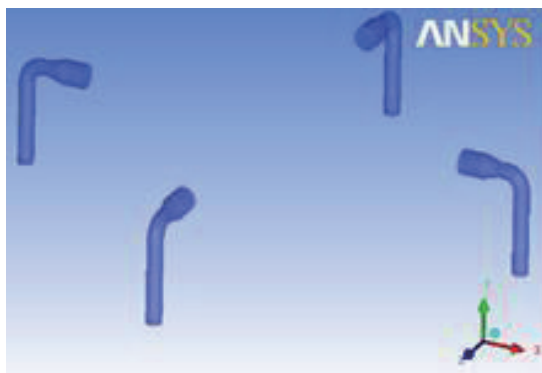


图2.3-3 超声波传感器的结构建模

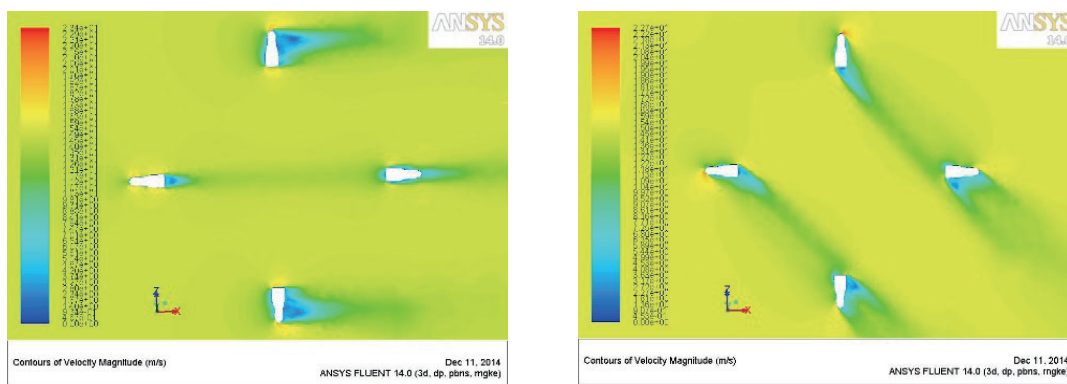


图2.3-4 阴影效应影响的模拟图

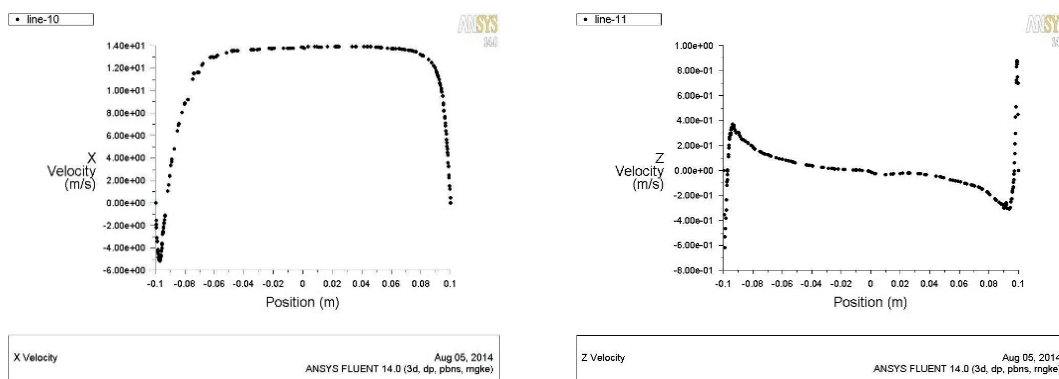


图2.3-5 风沿X轴方向运动时超声波传播路径上的风速分布图

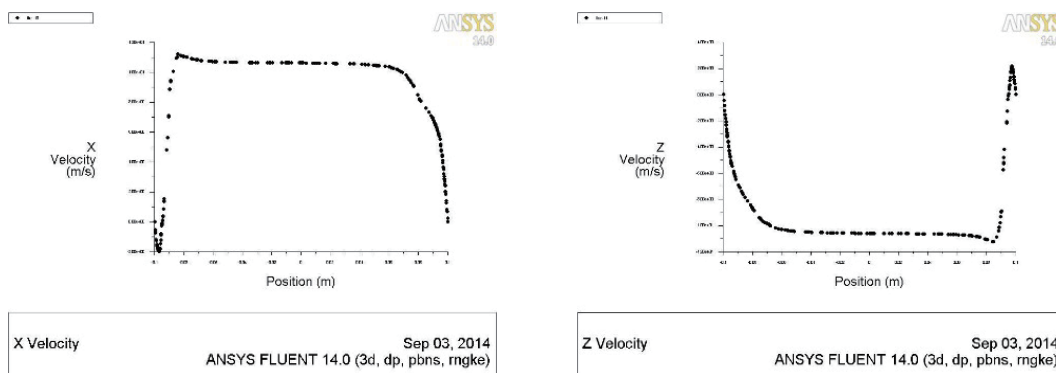


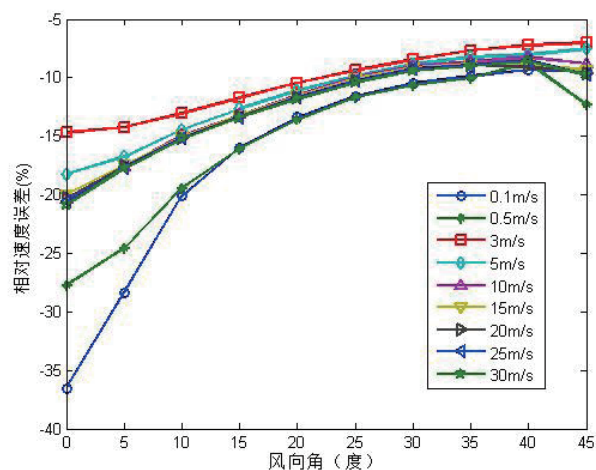
图2.3-6 风沿Z轴方向运动时超声波传播路径上的风速分布图



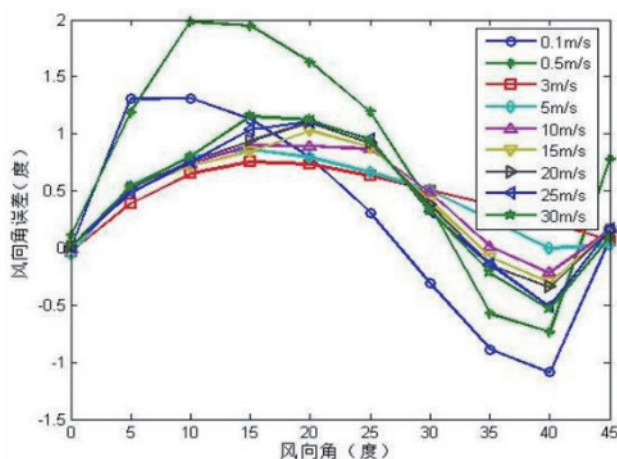
为了分析不同情况下阴影效应的影响效果，设计了风速和风向变化时，传感器对风场的影响，其变化参数如表2.3-1所示。仿真结果如图2.3-7所示。

表2.3-1 风速风向取样表

风速 (m/s)	0.1	0.5	3	5	10	15	20	25	30	
风向 (°)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45



(a) 风速测量误差



(b) 风向测量误差

图2.3-7 不同风速时测量误差图

根据图2.3-7可得出如下结论：

①不同风速下，风向测量的误差较小，不超过 $\pm 2^\circ$ 。可根据实际风速划分为两个区间，3m/s以下时误差接近 $\pm 2^\circ$ ；3m/s以上时可控制在 $\pm 1^\circ$ 以内。

②风速测量的误差较大，且测量值比真值偏低。也可根据实际风速划分为两个区间，3m/s以下时相对误差偏大，风速越小误差越大，极端情况可超过-35%；3m/s以上风速时相对误差基

本在-20%~-10%之间，风向角越接近45° 误差越小，随着风速增加相对误差曲线会逼近于一条固定的分布曲线。

③根据以上两点，超声风速计的测量算法中必须对风速测量的误差进行修正。这也解释了为什么超声风速计要根据风速大小分段给定精度指标（小风速时给出绝对误差，大风速时给出相对误差）。

（2）温度特性仿真测试

为了分析不同温度下，超声波测风传感器的测量误差，设计了温度变化时，传感器的仿真测试结果。温度变化从-50℃ ~ +50℃。仿真结果如图2.3-8、2.3-9所示。

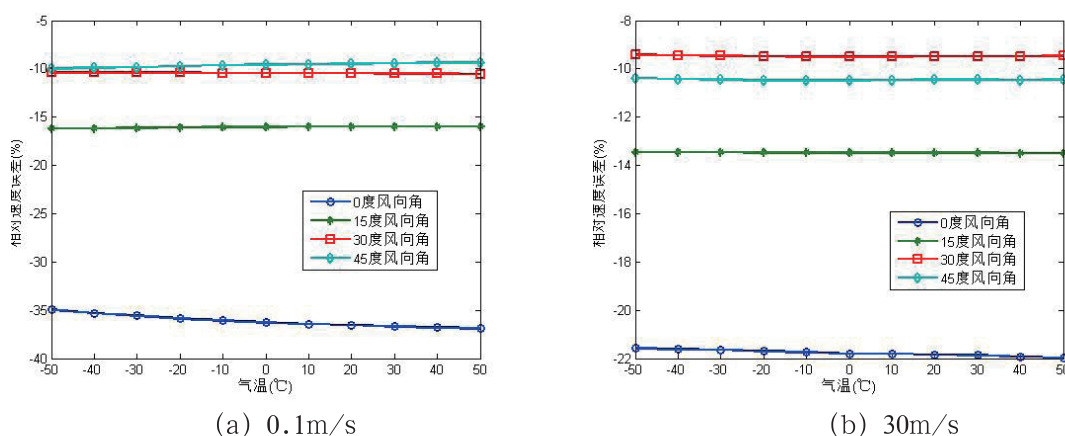


图2.3-8 不同风速时风速测量相对误差与气温的关系曲线图

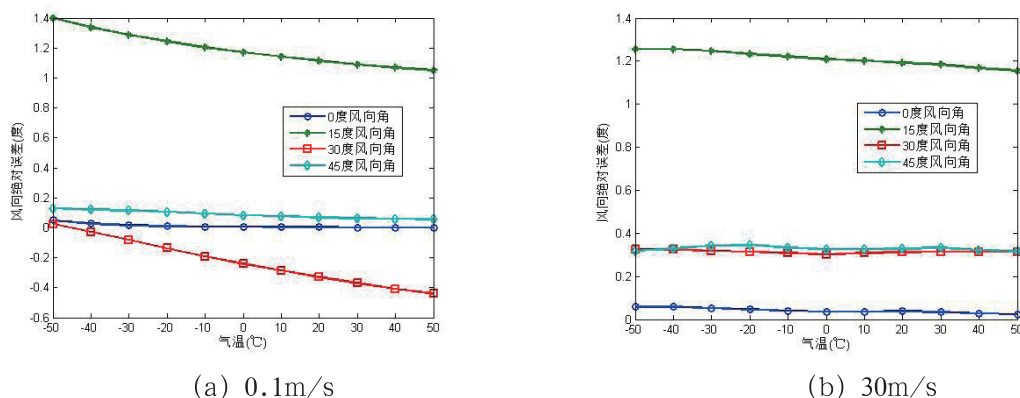


图2.3-9 不同风速时风向测量相对误差与气温的关系曲线图

通过图2.3-8及图2.3-9的分析可得出如下结论：

- ①气温对风速测量的影响不大，小风向角时至多改变相对误差2%左右，大风风向角时影响可忽略，这也验证了前文关于超声波测风传感器不易受温度影响这一结论。
- ②气温对小风速、中等风向角时的风向测量有一定影响，至多改变0.5度的测量误差。
- ③根据以上两点，气温变化不是造成超声波测风传感器测量误差的主要因素。



2.3.2 实验室测试

实验室测试的目的是确定超声波测风传感器在实验室状态下的测量性能。

本次试验共在实验室测试了5台超声波测风传感器。如表2.3-2所示：

表2.3-2 参试设备表

制造商	型号	数量
LUFFT	WS600	1
伦琴	SWD2000A	1
天津气象仪器厂	TJCS	3

测试方法：

将被试的超声波测风传感器放置于风洞中，施加不同风速，计算超声波测风传感器的测量误差。误差计算公式为：

$$\text{绝对误差: } \delta = W_{\text{测量值}} - W_{\text{标准值}} \quad (13)$$

$$\text{相对误差: } \sigma = (W_{\text{测量值}} - W_{\text{标准值}}) / W_{\text{标准值}} * 100\% \quad (14)$$

考虑到业务中使用的测风传感器均采用机械式，因此最大允许误差以机械式测风传感器的检定规程要求，为 $(\pm 0.5 + 0.03V)$ m/s。其中V为风速值。

测试结果：

① LUFFT WS600超声波测风传感器

表2.3-3 0° 放置时的测试结果

测试值		标准值		误差值		允许误差（机械式）	
风向	风速	风向	风速	风向	风速	风向	风速
358.40	0.75	358.00	0.57	0.40	0.18	5.00	0.52
360.53	1.56	358.00	1.56	2.53	0.00	5.00	0.55
359.49	4.26	358.00	4.29	1.49	-0.03	5.00	0.63
359.95	9.63	358.00	9.48	1.95	0.15	5.00	0.78
359.64	14.84	358.00	14.67	1.64	0.17	5.00	0.94
359.43	20.39	358.00	20.01	1.43	0.38	5.00	1.10
359.41	31.39	358.00	30.53	1.41	0.86	5.00	1.42
359.46	20.37	358.00	19.95	1.46	0.42	5.00	1.10
359.68	14.84	358.00	14.71	1.68	0.13	5.00	0.94
360.09	9.40	358.00	9.40	2.09	0.00	5.00	0.78
360.34	4.22	358.00	4.29	2.34	-0.07	5.00	0.63
361.62	1.55	358.00	1.56	3.62	-0.01	5.00	0.55
362.16	1.23	358.00	1.07	4.16	0.16	5.00	0.53

注：粉色值表示其误差结果超过了超声波测风传感器规定的 $\pm 2\%$ （或 $\pm 0.2\text{m/s}$ ）的指标，但未超过机械式测风3%的要求。

表2.3-4 45° 放置时的测试结果

测试值		标准值		误差值		允许误差（机械式）	
风向	风速	风向	风速	风向	风速	风向	风速
44.42	0.84	45.00	0.57	-0.58	0.27	5.00	0.52
44.79	1.06	45.00	1.07	-0.21	-0.01	5.00	0.53
43.58	1.73	45.00	1.51	-1.42	0.22	5.00	0.55
44.00	4.44	45.00	4.24	-1.00	0.20	5.00	0.63
44.55	9.70	45.00	9.43	-0.45	0.27	5.00	0.78
44.77	15.15	45.00	14.80	-0.23	0.35	5.00	0.94
44.89	20.34	45.00	20.02	-0.12	0.32	5.00	1.10
44.52	31.00	45.00	30.30	-0.48	0.70	5.00	1.41

注：粉色值表示其误差结果超过了超声波测风传感器规定的±2%（或±0.2m/s）的指标，但未超过机械式测风3%的要求。

表2.3-5 90° 放置时的测试结果

测试值		标准值		误差值		允许误差（机械式）	
风向	风速	风向	风速	风向	风速	风向	风速
90.80	0.80	90.00	0.99	0.80	-0.19	5.00	0.53
92.05	1.16	90.00	1.34	2.05	-0.18	5.00	0.54
91.14	1.59	90.00	1.76	1.14	-0.21	5.00	0.55
91.44	4.35	90.00	4.48	1.44	-0.13	5.00	0.63
91.36	9.54	90.00	9.60	1.36	-0.06	5.00	0.79
90.87	14.57	90.00	14.80	0.87	-0.23	5.00	0.94
90.66	19.92	90.00	20.23	0.66	-0.31	5.00	1.11
90.77	31.30	90.00	30.98	0.77	0.32	5.00	1.43

注：粉色值表示其误差结果超过了超声波测风传感器规定的±2%（或±0.2m/s）的指标，但未超过机械式测风3%的要求。

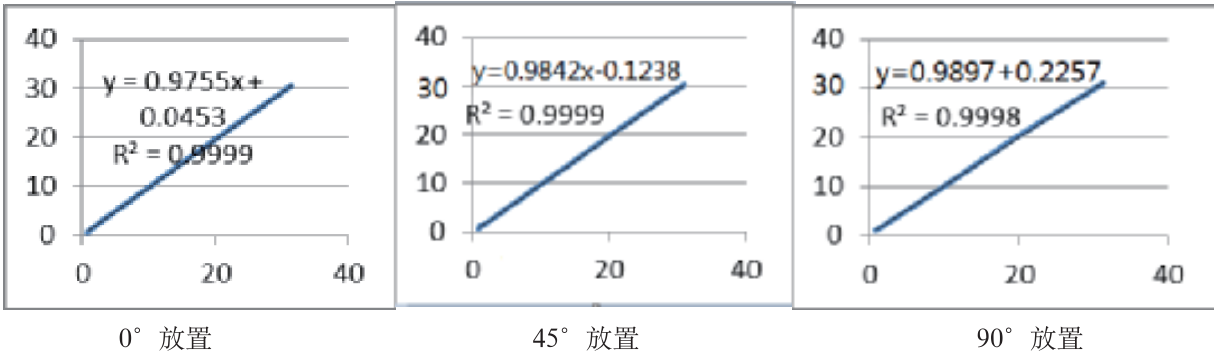


图2.3-10 LUFFT设备测试拟合曲线



从表2.3-3-表2.3-5分析,得到LUFFT的拟合曲线图,如图2.3-10。依据测试数据,可得出如下针对该具体设备的测试结论:

(a) LUFFT WS600型超声波测风传感器可以达到现有关于机械式测风相关规程的准确性要求。

(b) LUFFT WS600型超声波测风传感器安装方向对测风会产生一定的影响。由于安装位置的不同,会产生最大1.4%的差别。

(c) 与理论认识有所差别,在45°时,传感器测试的误差值超差数目更多,这可能是由于制造商做出了针对性的修正导致的。

(d) 超声波测风传感器的线性度良好,未来在业务应用中会减少周期性标定的工作量。

(e) 关于阴影效应的测试分析见表2.3-6。

表2.3-6 阴影效应测试表

0°			45°			90°			170°			179°			180°		
测试值	标准值	误差	测试值	标准值	误差	测试值	标准值	误差	测试值	标准值	误差	测试值	标准值	误差	测试值	标准值	误差
4.26	4.29	-0.03	3.90	4.24	-0.34	4.35	4.48	-0.13	4.25	4.40	-0.15	4.39	4.43	-0.04	4.35	4.40	-0.05
9.63	9.48	0.15	9.70	9.43	0.27	9.54	9.60	0.06	9.17	9.52	-0.35	9.44	9.54	-0.10	9.42	9.58	-0.16

结论:针对一个市场上成熟的超声波测风传感器而言,要么是阴影效应对产品的影响已经被修正,要么是这个影响非常小。

② 伦琴SWD2000超声波测风传感器

表2.3-7 0° 放置时的测试结果

测试值		标准值		绝对误差		最大允许误差(机械式)	
风向	风速	风向	风速	风向	风速	风向	风速
-8.13	0.71	0.00	0.81	-8.13	-0.10	5	0.52
-5.19	1.10	0.00	1.21	-5.19	-0.11	5	0.54
-3.37	1.70	0.00	1.76	-3.37	-0.06	5	0.55
-2.66	4.30	0.00	4.39	-2.66	-0.09	5	0.63
-3.18	9.01	0.00	9.54	-3.18	-0.53	5	0.79
-2.86	14.02	0.00	14.78	-2.86	-0.76	5	0.94
-3.06	18.73	0.00	20.04	-3.06	-1.31	5	1.10
-5.25	28.42	0.00	30.87	-5.25	-2.45	5	1.43

注:粉色值表示其误差结果超过了超声波测风传感器规定的 $\pm 2\%$ (或 $\pm 0.2\text{m/s}$)的指标,但未超过 $\pm 3\%$ 的要求,橙色值表示超过 $\pm 3\%$,但未超过机械式测风 $\pm (0.5+0.03V)$ 的要求。红色值表示超过机械式测风 $\pm (0.5+0.03V)$ 的要求。为直观显示,采用负值表示风向,其实际值应为 360° 与测量值之和。

表2.3-8 45° 放置时的测试结果

测试值		标准值		绝对误差		最大允许误差	
风向	风速	风向	风速	风向	风速	风向	风速
45.00	0.85	45.00	0.70	0.00	0.15	5	0.52
48.37	1.20	45.00	0.99	3.37	0.21	5	0.53
45.00	1.70	45.00	1.40	0.00	0.30	5	0.54
45.94	4.31	45.00	3.52	0.94	0.79	5	0.61
45.44	9.26	45.00	7.71	0.44	1.55	5	0.73
46.40	14.50	45.00	11.97	1.40	2.53	5	0.86
45.42	19.38	45.00	16.28	0.42	3.10	5	0.99
44.20	30.41	45.00	25.17	-0.80	5.23	5	1.26

注：粉色值表示其误差结果超过了超声波测风传感器规定的 $\pm 2\%$ （或 $\pm 0.2\text{m/s}$ ）的指标，但未超过 $\pm 3\%$ 的要求，橙色值表示超过 $\pm 3\%$ ，但未超过机械式测风 $\pm (0.5+0.03V)$ 的要求。红色值表示超过机械式测风 $\pm (0.5+0.03V)$ 的要求。

表2.3-9 90° 放置时的测试结果

测试值		标准值		绝对误差		最大允许误差	
风向	风速	风向	风速	风向	风速	风向	风速
90.00	0.80	90.00	0.81	0.00	-0.01	5	0.52
90.00	1.10	90.00	1.21	0.00	-0.11	5	0.54
90.00	1.70	90.00	1.81	0.00	-0.11	5	0.55
90.00	4.20	90.00	4.41	0.00	-0.21	5	0.63
90.00	9.40	90.00	9.52	0.00	-0.12	5	0.79
90.00	14.30	90.00	14.75	0.00	-0.45	5	0.94
90.30	19.00	90.00	20.11	0.30	-1.11	5	1.10
91.20	28.71	90.00	30.87	1.20	-2.16	5	1.43

注：粉色值表示其误差结果超过了超声波测风传感器规定的 $\pm 2\%$ （或 $\pm 0.2\text{m/s}$ ）的指标，但未超过 $\pm 3\%$ 的要求，橙色值表示超过 $\pm 3\%$ ，但未超过机械式测风 $\pm (0.5+0.03V)$ 的要求。红色值表示超过机械式测风 $\pm (0.5+0.03V)$ 的要求。

从表2.3-7-表2.3-9分析，得出结论：可能是伦琴的产品没有经过合格的出场测试，或者在使用过程中出现了未知的问题。

③ 天津气象仪器厂超声波测风传感器

由于本次试验的目的并非入网的测试评估，仅作科学分析，因此为了节省时间，天津气象仪器厂设备由其在安装前自行测试，共3台设备。测试结果见表2.3-10和表2.3-11。



表2.3-10 标准值为9.28m/s时的测试结果

时间	1#	2#	3#
0:01:00	9.3	9.2	9.3
0:02:00	9.3	9.2	9.3
0:03:00	9.3	9.2	9.3
0:04:00	9.3	9.2	9.3
0:05:00	9.3	9.2	9.2
0:06:00	9.3	9.2	9.2
0:07:00	9.3	9.2	9.2
0:08:00	9.3	9.2	9.2
0:09:00	9.3	9.2	9.2
0:10:00	9.2	9.3	9.2
0:11:00	9.2	9.3	9.2
0:12:00	9.3	9.3	9.2
0:13:00	9.3	9.3	9.2
0:14:00	9.3	9.3	9.3
0:15:00	9.3	9.2	9.3
0:16:00	9.2	9.2	9.3
0:17:00	9.2	9.2	9.2
0:18:00	9.2	9.2	9.2
0:19:00	9.2	9.3	9.2
0:20:00	9.3	9.3	9.2
均值	9.27	9.24	9.24
误差	-0.01	-0.04	-0.04

表2.3-11 标准值为1.85m/s时的测试结果

时间	风速5#	风速7#	风速8#
0:01:00	1.8	1.8	1.9
0:02:00	1.8	1.8	1.9
0:03:00	1.8	1.8	1.8
0:04:00	1.9	1.8	1.8
0:05:00	1.9	1.8	1.8
0:06:00	1.9	1.8	1.8
0:07:00	1.8	1.9	1.9
0:08:00	1.8	1.9	1.9
0:09:00	1.8	1.8	1.8
0:10:00	1.9	1.8	1.8
0:11:00	1.9	1.8	1.8
0:12:00	1.8	1.8	1.8
0:13:00	1.8	1.8	1.8
0:14:00	1.8	1.8	1.8
0:15:00	1.9	1.8	1.9
0:16:00	1.9	1.8	1.9
0:17:00	1.8	1.8	1.8
0:18:00	1.8	1.8	1.8
0:19:00	1.8	1.8	1.9
0:20:00	1.9	1.8	1.9
均值	1.84	1.81	1.84
误差	-0.01	-0.04	-0.01

结论：由于测试结果是经过长时间平滑平均的结果，所以测试误差很小。结合后期试验，该传感器性能相对较好。



2.3.3 外场比对测试

(1) 测试目的

- ①超声波测风传感器与传统机械测风传感器的可比性，超声波测风传感器工作的可靠性。
- ②测试超声波测风传感器的全天候工作能力评估。

(2) 参试设备

表2.3-12 外场比对的参试设备及测试时间(2014年)

参试设备	开始时间	截止时间
机械式测风传感器（1台）	5月22日	8月8日
	8月27日	9月26日
	10月10日	10月27日
天津超声波测风传感器（3台）	4月22日	8月8日
	8月18日	9月26日
	10月10日	10月27日
电子三所（2台）	8月8日	10月8日
	10月22日	10月27日
LUFFT	8月22日	8月29日
	9月2日	9月22日
伦琴	8月21日	8月31日
	10月22日	10月26日

(3) 测试内容

测试分为2个部分：（1）降雨情况下测风传感器的性能变化；（2）风场的典型变化情况。测试期间最大风速 $\leq 18\text{m/s}$ 。

选取了4个过程来测试降雨对超声波测风传感器的影响，见表2.3-13。

表2.3-13 3降水情况下的样本选取

过程	日期	时间	雨量（mm）	2分钟平均风速（m/s）
1	5月31日	20: 00	0.1	11.2
	5月31日	21: 00	5.7	6.3
2	6月17日	2: 00	0	5.3
	6月17日	3: 00	16.4	4.3
	6月17日	4: 00	16.7	4.1
3	7月1日	19: 00	0	2.2
	7月1日	20: 00	8	7.7
	7月1日	21: 00	26.5	2.2
	7月1日	22: 00	2.7	2.5
4	9月1日	21: 00	13.6	3.9
	9月1日	22: 00	8.3	2.3
	9月1日	23: 00	40.9	0

选取了2个过程来测试风场典型变化时的测试效果，这些过程覆盖了从2m/s-10m/s的风的变化过程，如图2.3-11所示。

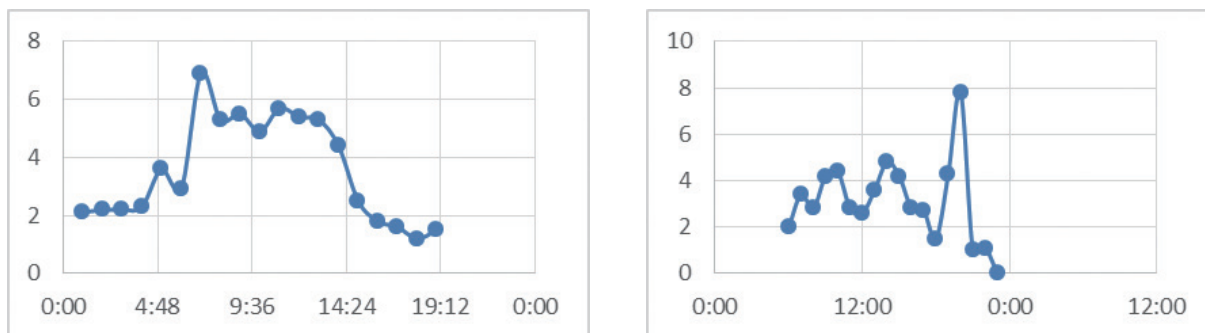


图2.3-11 2个典型的风的变化过程(横坐标单位时间，纵坐标单位m/s)

(4) 测试结果

①降雨对超声波测风传感器观测的影响

在选取的4个有降雨的情况下，统计分析了超声波测风传感器的观测数据。测试数据来源于天津气象仪器厂的3台设备，结果如图2.3-12至2.3-15所示。

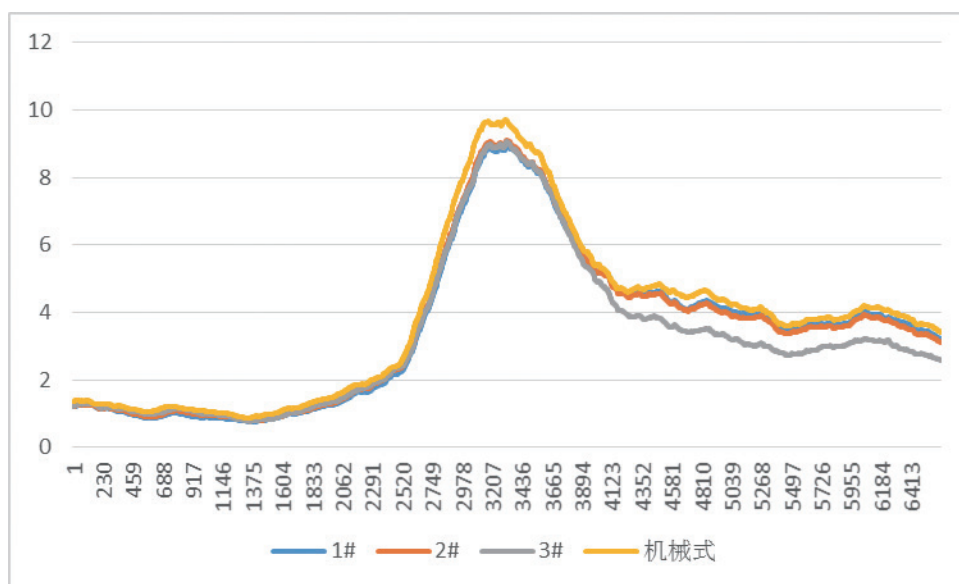


图2.3-12 5月31日观测结果(横坐标单位秒，纵坐标m/s)



图2.3-13 6月17日观测结果(横坐标单位秒,纵坐标m/s)

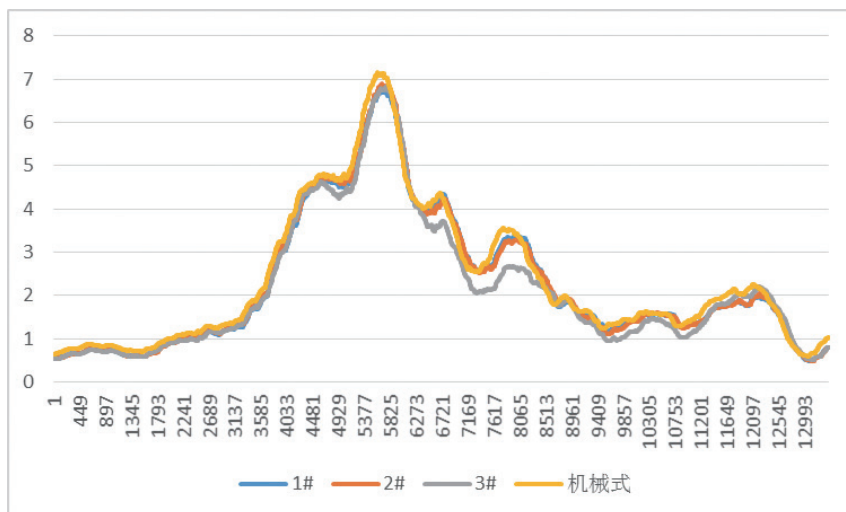


图2.3-14 7月1日观测结果(横坐标单位秒,纵坐标m/s)

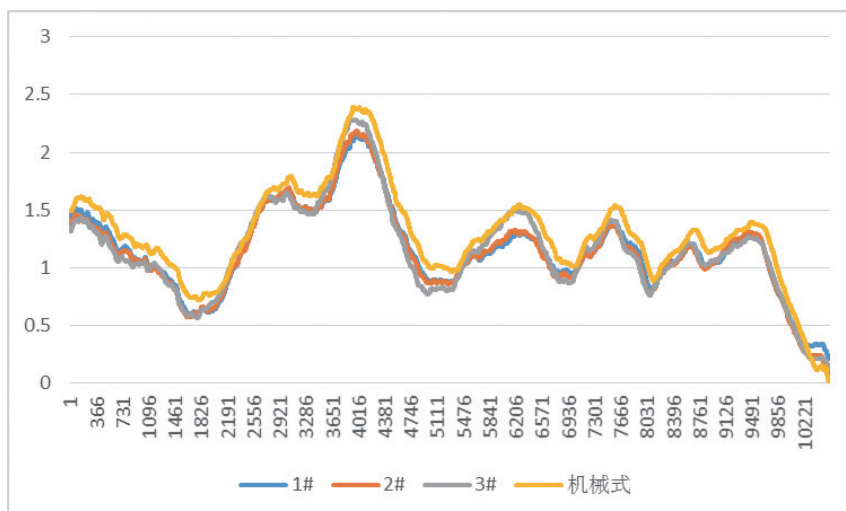


图2.3-15 9月1日观测结果(横坐标单位秒,纵坐标m/s)

初步结论:

a.超声波测风传感器与机械式测风传感器的变化趋势是一致的。

b.一般的，超声波测风传感器比机械式测风传感器的观测值偏小。初步认为是由于机械式测风传感器存在转动惯性造成的误差，导致其测试值偏大，超声波测风传感器观测值应该更为准确。

c.3#超声波测风传感器性能不够稳定，在有些情况下会出现与其他2个设备和机械式测风传感器的明显偏差。这是个别设备的性能问题，与超声波测风传感器的检测机理没有直接关系。图2.3-16是LUFFT超声波测风传感器的风洞测试值，其与标准器的吻合程度非常高，其在风速变化时的特性非常稳定。

上述内容都证明降雨不会对参加测试的超声波测风传感器的性能造成明显的影响。

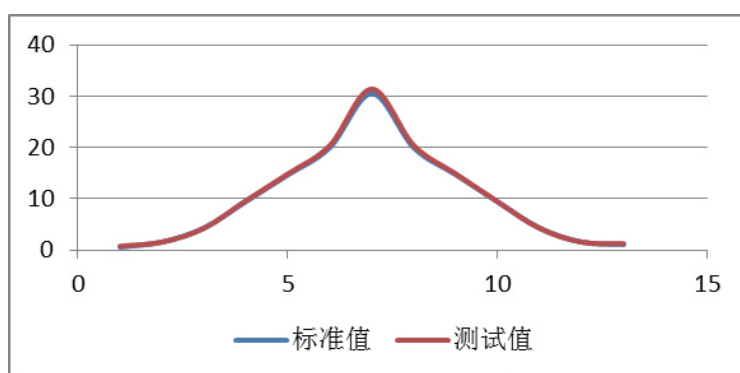


图2.3-16 超声波测风传感器在风洞中的测试值

②风场的典型变化情况测试

选取了3个风速变化比较明显的观测日，统计分析了超声波测风传感器的观测数据。其中，7月29日测试数据来源于天津气象仪器厂的3台设备，10月26日数据来源于天津气象仪器厂1号及3号设备，测试结果如图2.3-17、2.3-18所示。

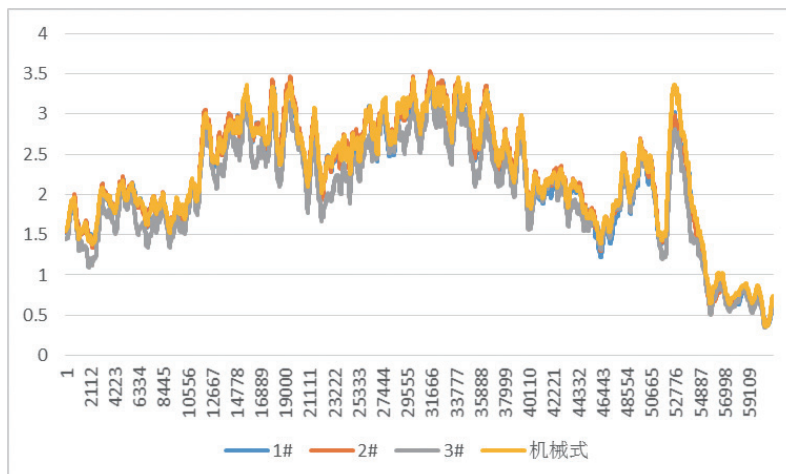


图2.3-17 7月29日超声波测风传感器观测值

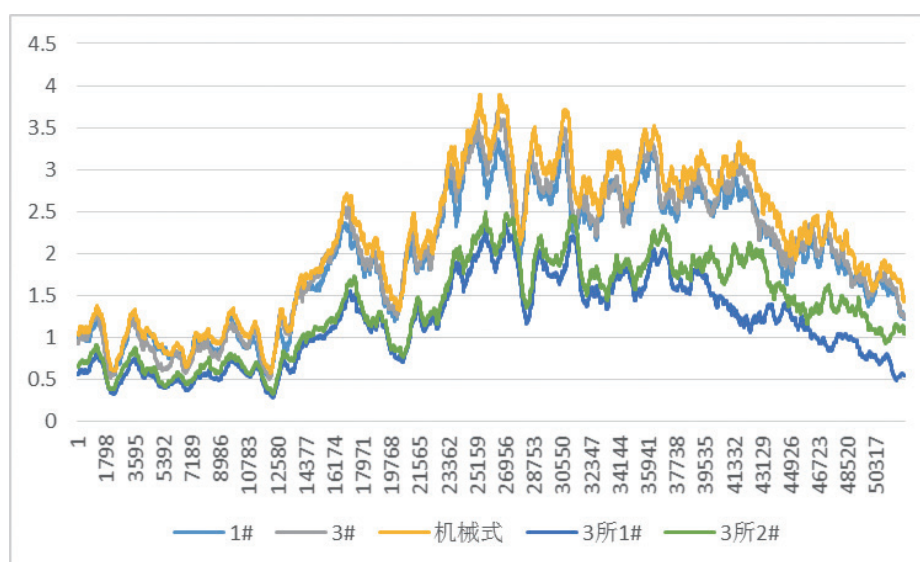


图2.3-18 10月26日超声波测风传感器观测值

初步结论:

a.超声波测风传感器与机械式测风传感器的变化趋势是一致的。

b.3所的2台设备存在较大的差别，因为之间并未对其进行实验室测试，初步判断是由于其未经过严格校准导致的。

2.4 试验结论

综合三方面的测试与分析，可以得出如下初步结论：

a.考虑到阴影效应的影响，高精度的超声波测风传感器的测量算法中需包含对风速测量的误差进行修正的内容，特别是在低风速下，阴影效应产生的误差可能会高达35%。超声波测风传感器基本不随温度的变化而变化，不需要针对温度变化进行补偿。

b.在实验室测试中，进口产品表现出了很高的准确性和线性。精度可以达到 $\pm 2\%$ ，且不受启动风速影响。部分国产设备技术指标相对较差，有些情况下还劣于机械式测风传感器。

c.超声波测风传感器（2维）与机械式测风传感器具有可比性，且不受降雨天气的影响。

d.超声波测风传感器具有在业务上作为机械式测风传感器备件并替换其使用的可能性，但不同制造商的产品存在较大的性能差异，需要进行完整的测试评估以进一步遴选合格设备。在条件允许的情况下，可进行高风速（ $\geq 65\text{m/s}$ ）以上的实验室测试，以确定超声波测风传感器在接近满量程时的观测效果。

3 利用近地面温湿度观测综合判别露、霜试验*

摘 要：本试验目的是想通过利用近地面温湿度观测数据提出露霜自动判别的方法，以解决露霜自动观测的问题。报告利用2014年1月23日至7月22日自建的近地面温湿度数据和自动气象站数据以及露、霜的人工记录和图像自动记录，研究露、霜综合判别技术。初步研究结论：确定了草温与近地面露点温度之差为露、霜形成的主要判别因子。当草温与近地面露点温度差小于某一阈值时发生结露结霜天气现象，且这个阈值与日最低气温有关。资料分析显示，利用综合指标判别露、霜得出结果与实测结果对应较好，一致率达到84.5%。近地面温湿度观测对露、霜有较好的指示作用。

3.1 背景和目的

随着现代气象业务的发展，地面气象观测自动化快速推进，近年来国内外在云、能见度、天气现象自动化观测设备的研制试验方面取得较大进展，但露、霜等地面凝结类天气现象还仍然依赖人工观测，存在着主观性强、观测频次低等弊端。露、霜与人们的生活和农业生产息息相关，其观测对农业生产、农业灾害意义较大，前期中国气象局气象探测中心和相关厂家从红外探测、图像识别、感雨器等多种角度开展了露霜观测研究，但这些观测方法均具有各自的局限性。因此，迫切需要借鉴前期相关经验深入开展露、霜观测试验和算法研究，推动地面凝结类天气现象的自动化观测。

露和霜的形成条件与近地表温湿度具有较强的相关性，国内学者结合自动站百叶箱温湿度、草温、露点温度等业务观测数据开展了一些露霜综合判别指标的研究工作，但由于百叶箱中气温、湿度传感器离地面1.5m高，不能直接反映出近地面的气象状况，对于地面凝结类天气现象的指示作用不佳。温显罡等人利用自动观测和结霜结露的人工观测资料研究露、霜的判别指标，结果表明草温与露点温度差对露和霜结成具有指示作用，但该研究受到结露结霜人工观测记录的局限，所得的指标无法对结露结霜的起止时间进行准确判别。本研究尝试通过增加近地面温湿度观测，并利用分钟采样频率的图像记录数据，来解决这些问题。

试验通过建立的近地面温湿度观测系统，利用近地面的温湿度数据、自动站数据以及露、霜天气现象的人工记录和图像自动记录，研究露霜的综合判别技术，为露霜自动观测的业务应用提供指示。

*本报告执笔人：茆佳佳，张雪芬，王志成



3.2 近地面观测系统设计

3.2.1 近地面观测系统设计

试验地点：中国气象局北京南郊大气探测试验基地（以下简称南郊站），该站与北京市气象台（54511站，以下简称北京站）位于同一场地，前者位于场地南侧，后者位于场地东侧。

观测设备：采用HMP155湿度传感器，外加通风防辐射罩（以减少环境对传感器的污染），开展近地层湿度观测；用铂电阻温度传感器开展草温观测。

设备布设：HMP155湿度传感器与草温传感器的安装高度接近，尽量贴近草面，以便更好地测量出草面的温度和湿度。试验设备布设的实况见图3.2-1。

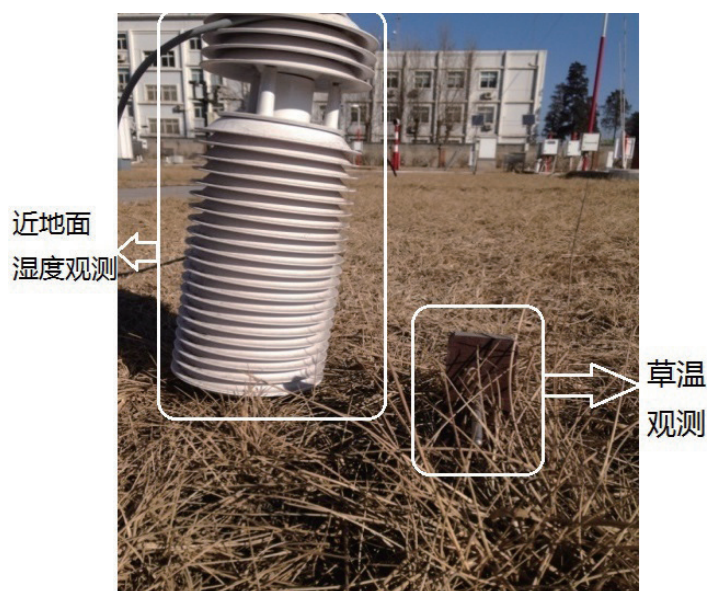


图3.2-1 试验设备布设图

3.2.2 试验数据说明

本试验研究中共使用了近地面温湿度观测、自动站观测数据、露霜的人工观测和图像自动观测数据作为结果检验，数据类别、观测要素等信息见表3.2-1。各数据在试验中的作用如下：将南郊站的气温、草温自动观测数据与北京站的观测数据进行比较，检验资料的可用性；将露、霜人工观测记录与图像自动观测记录相结合，形成露霜的实测记录，结露结霜的图像记录见图3.2-2；利用近地面湿度、草面温度和气温观测资料，结合露霜实测记录，分析露霜形成的综合判别指标。

试验时间：2014年1月23日～2014年7月22日。

数据预处理：剔除缺测、无效值、异常值和有降水过程的观测时次数据。

表3.2-1 试验研究使用的数据类别、观测要素等信息

数据类别	观测要素	分辨力	采样频率
近地面温湿度观测	近地面湿度	0.1%RH	1 min
	草面温度（南郊站）	0.1℃	1 min
自动站观测	气温（南郊站）	0.1℃	1 min
	气温（北京站）	0.1℃	1 min
	草面温度（北京站）	0.1℃	1 min
人工观测	露、霜天气现象		1天2次，6:30、20:30
	降水类天气现象		记录起止时间
图像自动观测	露、霜天气现象		1 min



图3.2-2 结霜结露图像记录（左图：结霜，右图：结露）



3.3 试验内容与分析

该试验分析思路是通过分析结露结霜时各要素的变化特征，分析露、霜天气现象发生时气象要素的变化规律，初步确定判别指标的因子；通过量化分析初选因子在结露结霜时的变化情况，确定露、霜判别指标。最后，通过回代方法对判别指标进行检验。试验分析路线图如3.3-1所示。

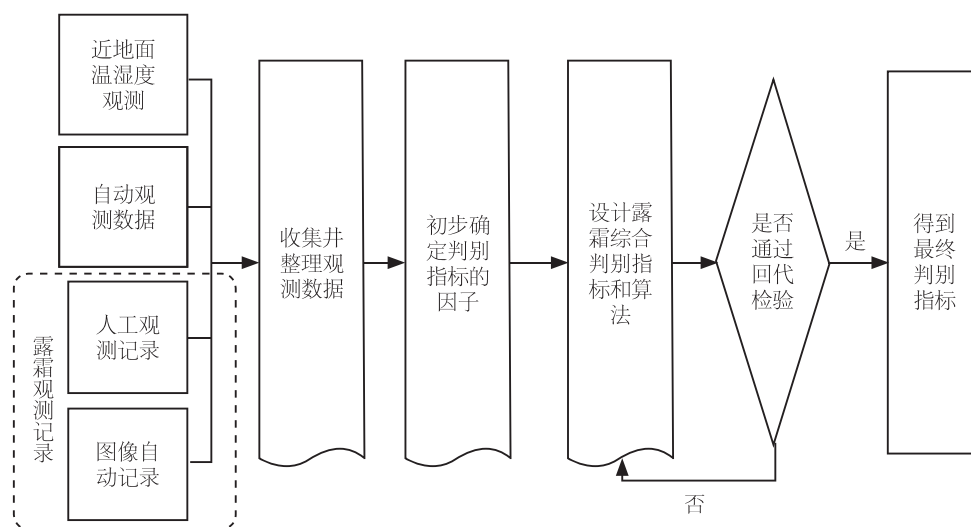


图3.3-1 试验分析路线图

3.3.1 原始数据质量分析

(1) 南郊自动站观测

为了检验南郊站和近地面观测资料的可用性，选取距离试验场地附近的北京站的观测资料进行比对分析。试验使用的自动观测要素见表3.3-1所示。本次比对选用2014年1月23日-5月31日的分钟数据，比对的要素是：北京站气温与南郊站气温、北京站草面温度与南郊站草面温度。各要素间的散点拟合情况见图3.3-2所示。

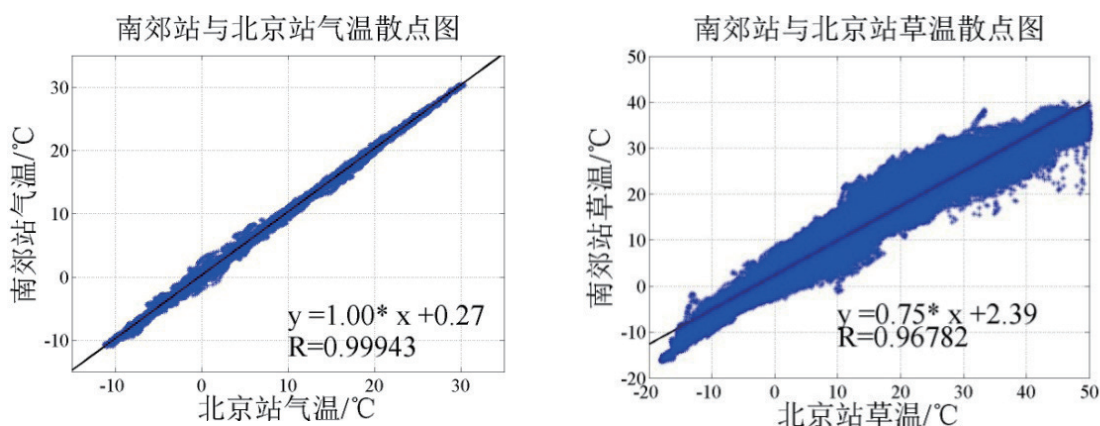


图3.3-2 各要素间的散点拟合图

由以上散点拟合图可以看出：（1）南郊站的气温数据与北京站具有较好的一致性，相关系数趋近于1；（2）两个站的草温数据虽然在变化趋势上较为一致，相关系数为0.97，且数据分布较为离散，说明两站的草温数据存在一定的差异。分析其原因，主要是由于两站草温观测的下垫面不一致造成的，与百叶箱内的气温观测不同，草温观测容易受到周围环境的影响，其传感器安装在距地6cm高度处，植被长势不同或者冬季无草层时土壤状况的不同都会给草温观测带来一定的影响。因此，在布设近地面湿度和草面温度观测设备时应注意不应离得太远，尽量保持下垫面的一致性。

表3.3-1 试验使用的自动站观测要素

测量要素	范围	分辨力	最大允许误差	数据频率
气温	-50℃~50℃	0.1℃	±0.2℃	1min
相对湿度	5%~100%	1%	±3% (≤80%)	1min
			±5% (>80%)	
露点温度	-60℃~50℃	0.1℃	±0.5℃	1min
风速	0~60m/s	0.1m/s	±(0.5+0.03V) m/s	1min
地表温度	-50℃~80℃	0.1℃	±0.2℃	1min

（2）近地面观测：近地面温度、近地面湿度，分辨率分别是0.1℃、1%，数据的输出频率均为每分钟一次。

（3）人工观测：露、霜天气现象（至少一天两次，6:30、20:30）、降水类天气现象。

（4）标准器图像：每分钟1次。图3.3-3分别是结霜结露时的图像记录。

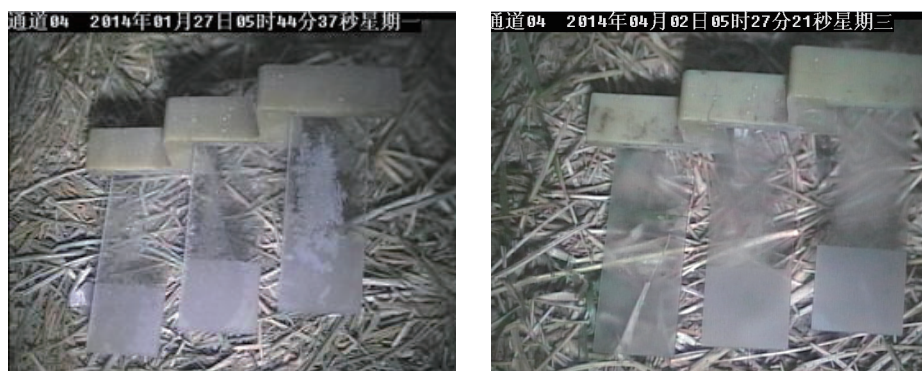


图3.3-3 结霜结露时的图像记录（左图：结霜，右图：结露）

3.3.2 初选因子

通过分析各要素的日变化特征，分析结露结霜和未结露结霜时、结露结霜前后气象要素的变化规律，初步确定了判别指标的相关因子。

（1）利用草温和近地面湿度，计算近地面露点温度

由于露和霜的形成与近地表水汽的饱和情况具有较强的相关性，因此在分析初选因子时引



进近地面露点温度。该要素由草温和近地面相对湿度计算而得，公式如下：

$$T_d = \frac{b \times \lg \frac{e}{E_0}}{a - \lg \frac{e}{E_0}} \quad (1)$$

$$e = U \times E_w / 100 \quad (2)$$

式中， T_d 为近地面露点温度， $^{\circ}\text{C}$ ； e 为近地面水汽压，hPa； a 系数，取7.69； b 为系数，取243.92； E_0 为 0°C 时的饱和水汽压，等于6.1078hPa； U 为近地面相对湿度，%RH； E_w 为草面温度 t 所对应的纯水平液面饱和水汽压，hPa。

(2) 个例分析

试验分析了结霜、结露与未结露结霜时草温与近地面露点的日变化情况，见图3.3-4。1月25日12时至1月26日12时期间（图a），图像记录显示于26日1:33-8:30发生结霜现象；3月26日12时至3月27日12时期间（图b），图像记录显示于27日0:44-7:06发生结露现象；3月15日12时至3月16日12时期间（图c），未发生结露结霜现象。可以发现当草温和近地面露点温度接近时，通常会伴随着结露结霜等凝结类现象的发生。因此，初步确定草温与近地面露点温度之差为露、霜判别的初选因子。

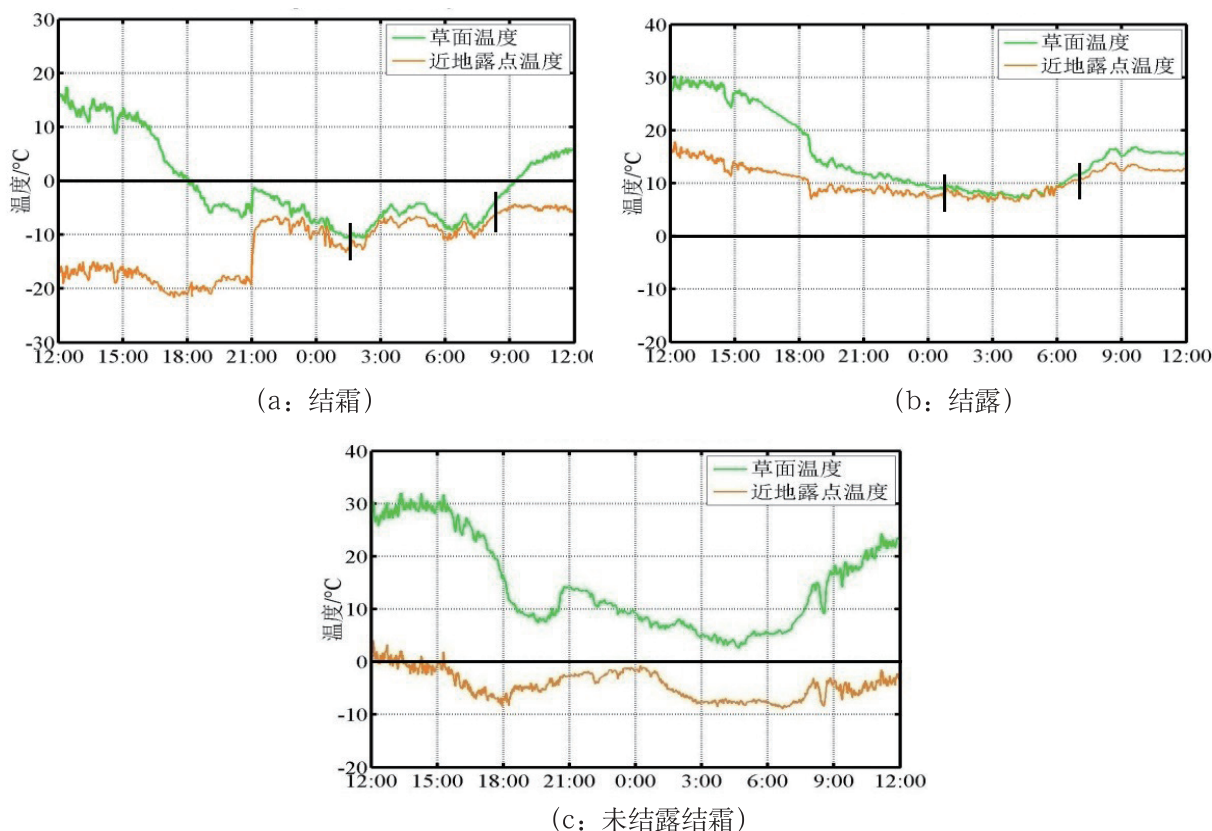


图3.3-4 草温与近地面露点温度日变化曲线图

（图a：1月25日12:00—1月26日12:00，图b：3月26日12:00—3月27日12:00，图c：3月15日12:00—3月16日12:00）

3.3.3 露霜综合判别指标和算法

(1) 散点序列图

为了了解在结露结霜时初选因子及各要素的变化情况，绘制了要素的散点序列变化图，用红圈表示结霜、绿圈表示结露。草温与近地面露点差（初选因子）的散点序列图见图3.3-5：

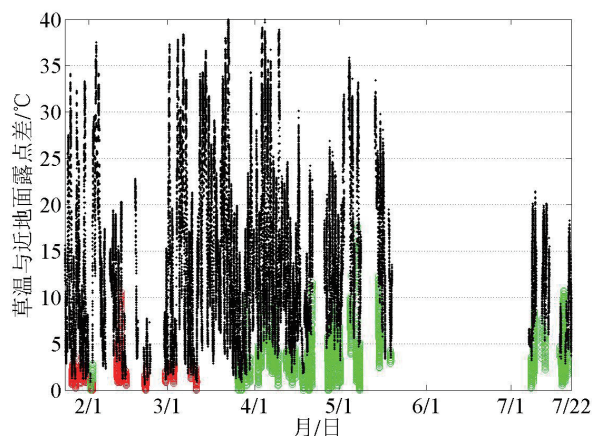


图3.3-5 草面温度与近地面露点差散点图

由图3.3-5可以看出，结露结霜时（红圈、绿圈）草温与近地面露点差接近于零，集中分布在一个范围之间： $0 \sim X$ ，其中 X 为是否发生露霜现象的阈值，且 X 从1月到7月有增大趋势。因此，草温与近地面露点可作为结露结霜的判别指标，但需找出1月到7月逐渐增大的规律。

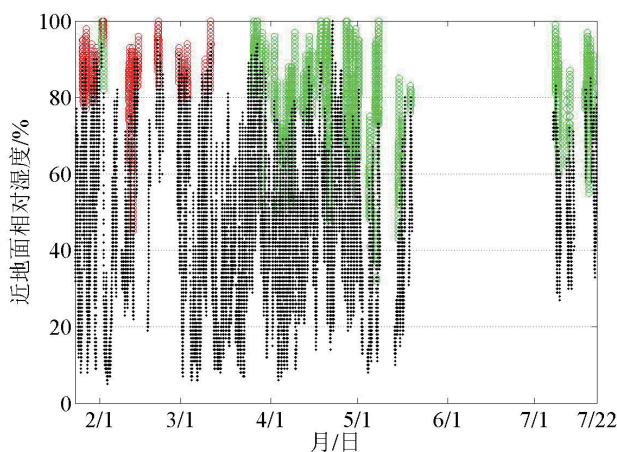


图3.3-6 近地面湿度散点图

从图3.3-6可以看出，结露结霜时的近地面湿度都较大，基本集中在80%以上，但不是所有相对湿度大于80%时都发生结露结霜现象，而且有些相对湿度为70%甚至60%左右也会发生凝结。所以，判别指标没有直接选用近地面湿度要素，而是选用草温与近地面露点差进行判别，这样判别结果相对更准确一些。



(2) 定量分析判别指标

为了确定结露结霜判别指标的数值大小, 统计分析了试验期间结露、结霜、未结露结霜时, 草温与近地面露点差的频率分布, 见图3.3-7。

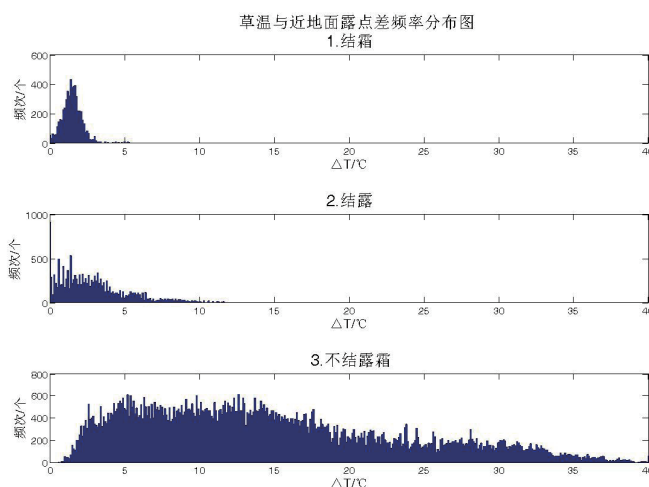


图3.3-7 草温与近地面露点差频率分布图

由图3.3-7可以看出, 结霜时, 草温与近地面露点差分布较为集中, 基本分布在0-3℃之间; 结露时, 草温与近地面露点差分布比结霜时较为分散, 基本分布在0-10℃之间。结霜与结露时这种分布差异的原因可以从图3.3-7看出, 随着1月到7月气温逐渐升高, 发生结露结霜现象时草温与近地面露点差的范围逐渐增大, 结露时的气温高于结霜时的气温, 所以结露时草温与近地面露点差的分布范围较大。因此, 若直接选用某一常数(草温与近地面露点差=X)作为判别指标将会造成较多的误判, 需要考虑气温变化的影响。

为了定量获取区分结露和结霜的指标, 本研究统计了结露、结霜时的气温频率分布图, 见图3.3-8。可以看出, 结露和结霜时的气温存在明显的分界线, 气温<2.1℃时发生结霜现象, 气温>2.1℃时发生结露现象。

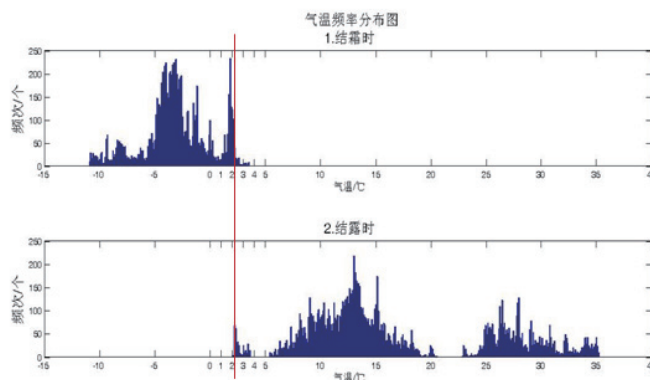


图3.3-8 气温频率分布图

(3) 判别指标与日最低气温关系

由以上分析可知，草温与近地面露点差作为结露结霜的判别指标之一，其与气温之间存在一定的变化关系，而结露结霜现象的发生一般在夜间气温较低的时段，所以判别指标可能与日最低气温有关系。为了了解这种关系，本研究对判别指标与日最低气温关系进行了线性拟合。由于结露结霜一般发生在夜间且可能早于20时，所以本次统计以每日12时至次日12时为一天，统计了试验期间发生结露结霜过程当天的日最低气温和草温与近地面露点差的关系。关系见图3.3-9。

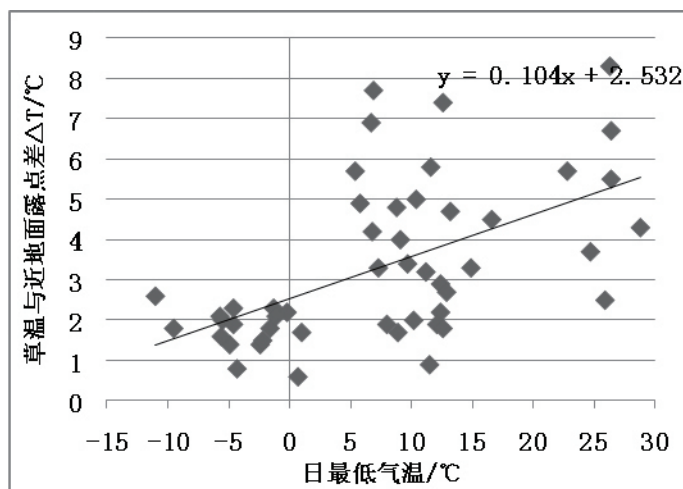


图3.3-9 草温与近地面露点差与日最低气温关系

横坐标代表每次结霜结露当天的日最低气温，纵坐标的确定原则是每次结露结霜过程中，80%的样本满足草温与近地面露点差 $<y$ 的条件。得到的拟合公式为： $y = 0.104x + 2.532$ ，其中， x 是日最低气温 $t_{\min}$ ， y 是判别指标 ΔT 。在实际应用中最低气温 $t_{\min}$ 可以取前一日的最低气温或最近一日的最低气温。该拟合图仅包含了最低气温-15到30℃的区间， $t_{\min} < -15^{\circ}\text{C}$ 时，判别指标或将逐渐趋近于零，这里取 $t_{\min} = -15^{\circ}\text{C}$ 时的判别指标值0.972； $t_{\min} > 30^{\circ}\text{C}$ 时，取 $t_{\min} = 30^{\circ}\text{C}$ 时的判别指标值5.652。

3.4 露霜判别指标的确定

3.4.1 判别指标

通过以上的分析综合形成了结露结霜的综合判别指标，见表3.4-1。



表3.4-1 露霜综合判别指标

现象种类	气温(℃)	草温与近地面露点差 ΔT (℃) (连续10min有90%样本通过检验)	其他	备注
霜	<2.1	$-15^{\circ}\text{C} \leq t_{\min} \leq 30^{\circ}\text{C}$ 时: $\Delta T < 0.104 \times t_{\min} + 2.532$	无降水天气	若先霜后露, 则不记露
露	≥ 2.1	$t_{\min} < -15^{\circ}\text{C}$ 时: $\Delta T < 0.972$ $t_{\min} > 30^{\circ}\text{C}$ 时: $\Delta T < 5.652$		

其中, ΔT = 草温-近地露点温度, 近地露点温度是用近地面相对湿度和草温计算得出。
 $t_{\min}$ 是观测前一日的最低气温或最近一日的最低气温。

3.4.2 试验结果验证

通过回代方法对露霜的判别指标进行检验。试验共181天, 每天分早晚两个样本, 剔除缺测和发生降水天气的样本173个, 共计189个样本。其中: 结霜样本24个, 结露样本56个, 未发生结露结霜现象的样本109个。根据露霜的综合判别指标进行判别, 判别结果与实际观测现象一致, 且起止时间误差在2h之内为判别正确, 结果显示: 结霜现象有3个样本漏判, 7个样本误判; 结露现象有13个样本漏判, 6个样本误判。判定结果和人工实测拟合情况统计, 如表3.4-2所示。

其中, 误判指: (1) 没有结露结霜被判作有结露结霜, 每天只要有一个时次误判即记作一次误判; (2) 判别结果与实际露霜起止时间相差超过2h; (3) 结霜判成结露, 或结露判为结霜; 漏报指: 没有判断出结露结霜的过程。一致率=正确识别发生和未发生某现象样本总数/样本总数*100%; 捕获率=正确识别某现象次数/该现象发生总次数*100%; 综合一致率=正确识别(露/霜/无现象)样本总数/样本总数*100%; 综合误报率指: 误判占总样本的百分比; 综合漏报率指: 漏判样本占总样本的百分比。

表3.4-2 判定结果和露霜实测记录比对情况

露		霜		综合		
露一致率	露捕获率	霜一致率	霜捕获率	综合一致率	综合误报率	综合漏报率
88.5%	76.8%	92.5%	83.3%	84.49%	6.95%	8.56%

从表3.4-2可以看出, 利用气温、草温、近地面湿度这几个观测要素设计的判别算法对结露结霜具有较好的识别效果, 与露霜实测记录比对结果综合一致率达到84.5%。

对于漏判和误判的情况, 可能是由于以下几点原因造成的: (1) 人工观测的误差。图片记录和人工观测对于一些暗霜或者不明显的霜可能会漏记, 使得结果中霜的误判增多。(2) 在贴近地面的高度进行湿度观测, 防辐射罩和测量器件容易受到污染, 造成的测量误差也会给

综合判定结果带来一定的影响。(3) 时间累积效应不确定性造成误差。天气现象的发生需要一定时间的累积效应,在判别条件设置上需要考虑这个因素。如当气象条件达到阈值多久后才会发生凝结、超出阈值多久后凝结才会消散,这一时间效应还需在实践中进一步探索。

3.5 试验结论

本研究通过在近地面增加温湿度观测,并结合其他气象要素观测,利用综合指标判别露、霜得出结果与实测结果对应较好,正确率达到84.5%。这说明试验设计的综合判别指标对露霜有较好的指示作用,增加近地面温湿度观测进行露霜现象的判别具有一定的可操作性。

此外,本研究对露、霜现象的实测记录不仅使用了人工观测方法,还采用了图像自动记录的方法,分钟图像的记录使准确记录露、霜起止时间成为可能,对确定露、霜形成时气象条件的阈值起到了重要的作用。

由于试验统计的样本局限在一个站点,本研究结论虽能说明一定问题,但尚不全面,还需在不同气候环境下作进一步的检验和修正,这样才能具有广泛地适用性。

4 地面凝结现象仪试验*

摘 要：本试验目的是分析企业研发的地面凝结现象仪设备性能和业务可用性。报告利用2014年1—5月中国气象局大气探测试验基地（北京南郊）的10套（2种技术体制）地面凝结现象仪与人工进行平行观测。资料分析显示：电容式/电阻式露、霜传感器在准确率及维护和性价比上占有一定的优势，但地面凝结现象的判别准确率还达不到业务应用的要求，设备需进一步完善设计，试验改进。

4.1 背景和目的

随着气象综合探测业务的发展，地面气象观测自动化快速推进，气象自动观测站在地面气象观测业务上的普遍使用很大程度上提高了观测精度和观测效率。近年来国内外在云、能见度、天气现象自动化观测设备的研制方面取得较大突破，但还有一些项目没有成熟的自动观测设备，如露、霜等地面凝结类天气现象还依赖人工观测，存在主观性强、观测频次低等弊端。

露、霜与人们的生活和农业生产息息相关，对农业生产、农业灾害意义较大。植物叶片暴露在有露、雾和降水形成的液体水分中，对于植物病害、昆虫活动以及作物收割和加工处理等起着重要的作用。世界气象组织对露和叶片湿润持续时间的仪器也有较为详细的阐述。霜形成的同时往往会对植物产生冻害，即“霜冻”。农业气象上根据终霜和初霜统计无霜期，它是一个很重要的热量指标，在农业气象和气候区划中广泛应用。

因此，地面凝结类天气现象的观测是十分必要的，2014年中国气象局气象探测工程研究中心开始联合相关仪器生产厂家从红外遥感、感雨器等多种角度开展露、霜观测对比试验研究。

4.2 设备及工作原理

4.2.1 参试设备

探测中心组织5个仪器厂家共计10套设备在中国气象局大气探测试验基地进行地面凝结现象仪的试验改进和对比测试工作，各设备详细参数如表4.2-1所示。

*本报告执笔人：胡树贞，王志成，朱君，张雪芬

表4.2-1 参试设备参数

参试厂家	观测要素	实现方案
华云升达（北京）气象科技有限责任公司（华云升达）	露、霜	近红外遥测
河南中原光电测控技术有限公司（中原光电）	露、霜	近红外遥测
凯迈(洛阳)环测有限公司（洛阳凯迈）	露、霜	电容式
中环天仪（天津）气象仪器有限公司（中环天仪）	露、霜	电容式
无锡信大气象传感网科技有限公司（无锡信大）	露、霜	电阻式

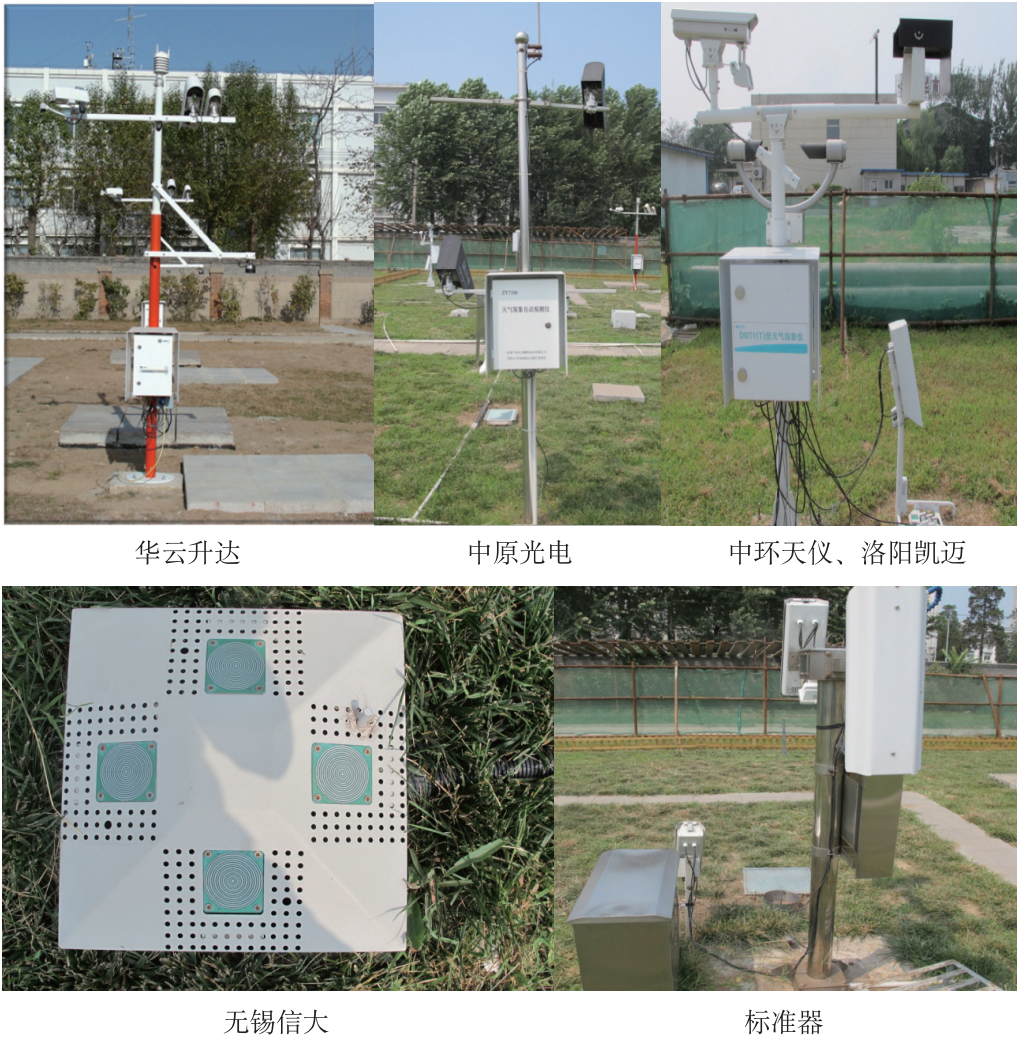


图4.2-1 参试设备外观

4.2.2 工作原理

地面凝结现象仪由传感模块、采集和处理模块、数据通信模块、数据存储模块及电源等部件组成,逻辑框图如图4.2-2所示。

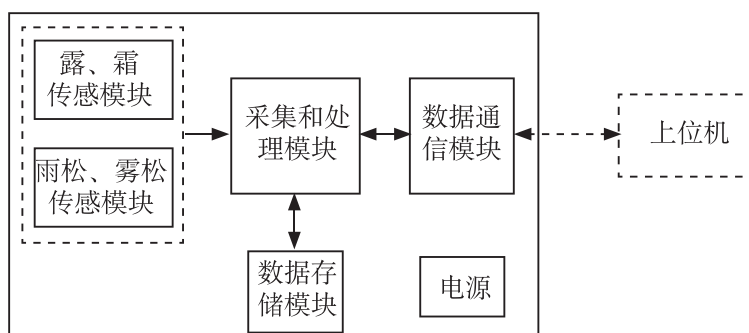


图4.2-2 地面凝结现象仪逻辑框图

传感模块的感应面/探头/测量架应采用亲水材质制作，并具有与自然下垫面同步的地面凝结现象形成和消散功能，以保证传感模块能够真实地反映地面凝结现象的发生过程。

电容式传感模块测量感应面上梳状电容的变化值。感应面在干燥时，测量电路的电容值不变，当露或霜现象发生后，感应面电容值增大，变化的电容值转换为频率值后输出。电容式传感器计算测量电路当前的频率值、统计频率值的变化趋势及持续时间等参数，结合温度观测数据，设定判别阈值，实现露、霜现象的自动判别。

电阻式传感模块测量感应面测量电路的电阻值。感应面受潮电阻值发生变化，当露或霜在感应面上形成时，电阻的阻值下降，变化的电阻值经过转换电路转换为数字信号输出。统计电阻值的变化特征，结合温度观测数据，设定判别阈值，实现露、霜现象的有效判别。

近红外遥测设备采用三个对冰水敏感的近红外波段，发射器发射这种光波到地面，利用露、霜对三个波长红外光散射和吸收性能的不同，进行物质判断。首先模拟自然气象环境，通过实验选择与自然环境凝结相近的凝结板。通过实验室试验累积大量的试验数据，建立露、霜各种状态与近红外光谱之间的数学模型，进行露、霜现象的自动识别。

4.3 数据来源

从2014年1月开始探测中心组织人员在南郊每天（降水天气除外）6:30前后定时进行人工观测，并对标准器每分钟拍摄的图片数据进行人工识别，确定每个地面凝结现象过程发生的起止时间。

参试设备每分钟按照地面气象观测数据对象字典格式输出一一次地面凝结现象自动识别结果。

由于各厂家进行设备改进或算法更新，各厂家设备观测时间长短不一，具体对比时间段见表4.3-1，各参试设备数据采集情况见表4.3-2。

表4.3-1 人工对比观测数据记录格式

日期	人工观测现象	人工观测时间	标准器观测结果	标准器起止时间
2014年1月1日	无凝结现象	6:30	无凝结现象	无凝结现象
2014年1月2日	无凝结现象	6:48	无凝结现象	无凝结现象
2014年1月3日	无凝结现象	6:47	无凝结现象	无凝结现象
2014年1月4日	霜	6:44	霜	0:56-11:07
2014年1月5日	霜	6:52	霜	20:03-9:40
2014年1月6日	无凝结现象	6:35	霜	23:00-2:36
2014年1月7日	无凝结现象	6:38	霜	6:38-8:16
2014年1月8日	无凝结现象	6:35	无凝结现象	无凝结现象
2014年1月9日	无凝结现象	6:38	无凝结现象	无凝结现象
2014年1月10日	霜	6:40	无凝结现象	无凝结现象
2014年1月11日	霜	6:40	无凝结现象	无凝结现象
2014年1月12日	无凝结现象	6:35	无凝结现象	无凝结现象
2014年1月13日	无凝结现象	6:35	无凝结现象	无凝结现象
2014年1月14日	霜	6:35	霜	0:12-9:23
2014年1月15日	霜	6:40	霜	0:33-9:33

表4.3-2 各参试设备数据采集情况

试验厂家	数据采集时间段	备注
中原光电设备1	1月1—5月31号	11月14日改为电阻式
中原光电设备2	1月1—5月31号	
华云升达设备1	1月1—5月31号	9月1日改为电容式
华云升达设备2	3月29—5月31号	
无锡信大设备1	1月1—4月6号	数据偶尔有中断
无锡信大设备2	1月1—4月6号	
中环天仪设备1	3月6—5月31号	偶尔会出现F，原因是下位机软件关闭
中环天仪设备2	4月10—5月31号	
洛阳凯迈设备1	2月6—5月31号	
洛阳凯迈设备2	4月10—5月31号	

4.4 数据分析

4.4.1 评估标准

主要从样本识别一致率、凝结现象捕获率判断地面凝结传感器的性能。其计算公式如下：

一致率=正确识别发生和未发生某现象样本总数/样本总数*100%；

捕获率=正确识别某现象次数/该现象发生总次数*100%；

对比观测期间也从仪器整体识别率方面进行了分析，具体的计算公式为：

综合一致率=正确识别（露/霜/无现象）样本总数/样本总数*100%。



4.4.2 判定方法

目前露、霜现象人工不能进行持续观测，而标准器载玻片上露、霜形成的机理与自然界植物叶面上形成的机理不同，因此不能严格意义上获取露、霜现象准确发生的起止时间，本报告中对各参试设备识别准确性按照以下两种方法进行分别统计：

方法一：以人工定点观测为主，标准器为辅助观测。在人工每天定点观测前后各1个小时内，若待测设备只输出与人工观测结果相同的地面凝结现象，则待测设备判别正确，若有其他现象输出则为误判，人工观测有凝结现象，而仪器未输出现象则为漏判。

方法二：露、霜现象按照气象日界一天一次统计识别准确率。若人工定点观测与标准器连续观测相结合观测到露、霜现象，仪器当日仅识别到该现象，视为仪器观测正确，否则视为仪器漏报。人工观测与标准器结合没有观测到地面凝结现象，而仪器判断有，视为仪器对该天气现象误报。

4.4.3 方法一试验评估结果

由于试验设备安装试验时间段稍微不同，造成有些设备对比试验期间霜现象未发生，比如华云升达设备2、中环天仪设备1、洛阳凯迈设备2，在表中标注为“未发生”。各厂家10台设备分析结果见表4.4-1。

表4.4-1 利用方法一各厂家设备评估结果

试验厂家	露准确率		霜准确率		不区分观测要素		
	露一致率 (%)	露捕获率 (%)	霜一致率 (%)	霜捕获率 (%)	综合一致率 (%)	综合误报率 (%)	综合漏报率 (%)
中原光电设备1	84.5	83.8	84.1	82.1	84.0	10.4	5.6
中原光电设备2	75.9	67.6	77.6	71.4	75.0	14.6	10.4
华云升达设备1	87.1	70.3	87.9	67.9	83.3	3.5	13.2
华云升达设备2	78.3	60.6	未发生	未发生	78.3	1.7	20.0
无锡信大设备1	78.5	90.0	73.5	67.9	75.3	15.1	9.7
无锡信大设备2	73.8	100	68.7	67.9	72.0	19.4	8.6
中环天仪设备1	77.2	64.9	87.0	75.0	77.1	7.2	15.7
中环天仪设备2	70.8	62.5	未发生	未发生	70.8	10.4	18.8
洛阳凯迈设备1	70.7	78.4	72.2	94.1	74.3	18.4	7.3
洛阳凯迈设备2	70.8	70.8	未发生	未发生	70.8	14.6	14.6

从上表可看出对于露一致率所有厂家均达到70%及以上，对于露捕获率中环天仪的2台设备和华云升达设备明显低于70%指标。除对比试验期间未发生霜现象的设备外，其余设备的霜

一致率基本能达到70%的指标，霜捕获率有2个厂家3台设备低于70%的技术指标。

若不区分露、霜观测要素，所有设备的综合一致率（露/霜/无现象）均达到了70%的性能指标。

4.4.4 方法二试验评估结果

利用方法二对各厂家10台设备分析结果见表4.4—2。

表4.4-2 利用方法二各厂家设备评估结果

试验厂家	露准确率		霜准确率		不区分观测要素		
	露一致率 (%)	露捕获率 (%)	霜一致率 (%)	霜捕获率 (%)	综合一致率 (%)	综合误报率 (%)	综合漏报率 (%)
中原光电设备1	67.8	62.5	67.3	58.6	65.9	31.2	2.7
中原光电设备2	58.3	50.0	51.9	24.1	51.4	41.0	7.6
华云升达设备1	86.0	72.5	86.5	68.9	82.6	7.6	9.7
华云升达设备2	80.0	69.4	未发生	未发生	80.0	3.3	16.7
无锡信大设备1	67.2	90.9	63.4	65.5	66.7	25.8	7.5
无锡信大设备2	56.2	100.0	48.8	51.7	54.8	39.8	5.4
中环天仪设备1	77.2	72.5	79.1	50.0	75.9	12.0	12.0
中环天仪设备2	75.0	73.1	未发生	未发生	75.0	10.4	14.6
洛阳凯迈设备1	64.1	80.0	49.3	41.2	60.6	33.0	6.4
洛阳凯迈设备2	70.8	76.9	未发生	未发生	70.8	16.7	12.5

从上表可看出利用方法二对各厂家进行评估，评估结果的准确性较方法一降低，究其原因 是各厂家设备在进行露、霜判别时容易出现露、霜交替发生的现象，特别是在霜融化后按照地面观测规范定义是不需要记录的，而较多的厂家会输出露，因而造成较多的误判。

4.5 试验结论

从2014年上半年数据分析情况看，利用方法一定点时刻观测各厂家对露、霜的识别结果要比严格按照地面观测规范定义来进行评判效果好。具体分析原因是：（1）方法一：在地面凝结现象发生时，设备漏报。（2）方法二：在全天时刻设备交替出现露、霜现象，造成设备误报率较高。（3）人工定时观测和标准器观测的数据主观性大，另外各厂家安装设备场地下垫面情况不一，也是造成数据准确性较低的原因。

从数据分析看，电容式/电阻式露、霜传感器从准确率及维护和性价比上占有一定的优势，但是对地面凝结现象的判别还达不到业务应用的要求，还需进一步进行对比改进试验。

5 相对湿度自动与人工观测比对分析*

摘 要：为了确定现有湿度自动观测与人工观测数据是否具有可比较性以及它们之间的偏差情况，本报告利用全国保留人工观测的8个国家基准气候观测站2007~2013年的自动和人工观测相对湿度的整点数据进行比对分析。资料分析表明：自动站相对湿度的观测结果系统性低于人工观测结果，且随着湿度的增加，两者的系统偏差增大。两者间的系统偏差为 $-0.1\% \sim -5.69\%RH$ ，标准偏差在 $2.02\% \sim 3.39\%RH$ 之间。夏季自动和人工相对湿度观测的差异最大且与环境风速有关，在低风速下自动与人工观测间差异较大，随着风速的增大，差异逐渐减小；气温对相对湿度观测也有一定影响。两类观测逐小时数据未见明显的时间差异；自动和人工相对湿度观测偏差的日变化为：清晨相对湿度较高时，高湿地区台站偏差较大；下午相对湿度低时，偏差较小。

5.1 背景和目的

相对湿度是揭示空气中水汽变化的重要气象要素，对于天气预报中雾的生成和是否有降水、大气折射率的计算等是至关重要的。自2012年4月1日起，进行了几十年的相对湿度等常规气象要素的人工观测被自动观测所取代，我国2300多个地面气象站全部采用自动气象观测系统，全国仅保留了8个国家基准气候站的人工观测，自动气象站的观测原理、观测方法与人工观测相比均发生了很大变化。观测系统的变化导致观测结果之间的差异是不可避免的，而这种差异会造成气候趋势演变以及极端天气事件的分析误差甚至错误，所以将这两种系统取得的观测资料进行比对是非常必要的。

对于自动观测与人工观测之间的差异分析，国外已经进行了大量的研究。结果表明，自动观测替代人工观测后，观测数据存在差异。美国自20世纪80年代末开始布设的自动地面观测系统，与人工观测系统的资料有着明显差异。在国内，对观测系统发生变化而引起的气象参数观测结果的差异进行了研究，如气温、降水等，但对较大样本相对湿度的比对分析较少。曾英、苑跃等分别对陕西和四川省的相对湿度自动与人工观测进行比对分析，结果表明，自动观测相对湿度的日平均值比人工观测偏低近3%。余君等对全国17个站点2005年自动与人工观测相对湿度进行比对分析，结果表明自动站观测结果存在偏干现象，年平均在3.5%左右。

*本报告执笔人：茆佳佳，莫月琴，阳艳红，陈瑶

为了解人工观测相对湿度与仪器观测结果间的差异，该文对保留人工观测的8个国家基准气候站2007~2013年的比对观测数据进行分析研究、评估和总结，揭示两种观测技术体制观测数据的可比较性及自动观测数据的稳定性。

5.1.1 资料来源

长期保留人工器测观测任务的八个国家基准气候站近7年（2007~2013年）自动与人工观测的比对数据，其中2007年1月~2012年3月为正点观测数据，2012年4月~2013年12月为02、08、14、20时4次观测比对数据。

八个国家基准气候站分别是：位于我国西北部区域的银川（53614）、阿勒泰（51076），格尔木（52818）；位于我国北部区域的长春（54161）、张北（53399）；位于我国中部区域的寿县（58215）和位于我国南部区域的贵阳（57816）、电白（59664），观测地点如图5.1-1所示。



图5.1-1 长期保留人工观测的八个国家基准气候站分布图

其中自动站的气温、湿度数据以1分钟平均值为瞬时值，本次比对使用整点自动观测数据为1分钟瞬时值。

5.1.2 评估方法

气温高于0℃时，以人工观测数据为参考，进行不同环境条件下两种观测数据的比对，以统计两者之间年、月、季的误差变化情况和数值差异。用系统偏差和标准偏差进行评估，并进行显著性检验。

《地面气象观测规范》中规定百叶箱干湿表在气温0℃~-10℃时溶冰观测，气温低于-10℃



时换用毛发湿度表（计），气温低于零度时的湿度观测可能存在较大误差，所以气温低于零度时的湿度观测在5.4节单独讨论。

5.1.3 观测仪器说明

经调研，2007～2013年间，台站的自动站均采用芬兰Vaisala湿敏电容湿度传感器观测相对湿度；人工相对湿度观测， -10°C 及以上采用百叶箱干湿表，气温低于 -10°C 时换用毛发湿度表（计）。各台站均按规定进行了校验和检定，具体情况见表5.1-1。

表5.1-1 仪器设备情况说明

台站	人工仪器	自动仪器	检定情况
阿勒泰	干湿球温度表（ $t \geq -10^{\circ}\text{C}$ ） 毛发湿度表（ $t < -10^{\circ}\text{C}$ ）	HMP45D温湿传感器	干湿球温度表新出厂的3年检定1次，之后5年1次；毛发湿度计每年夏天检定一次；湿度传感器2年检定一次。
电白	干湿球温度表（ $t \geq -10^{\circ}\text{C}$ ） 毛发湿度表（ $t < -10^{\circ}\text{C}$ ）	HMP155温湿传感器	湿度传感器每两年更换一次
银川	干湿球温度表（ $t \geq -10^{\circ}\text{C}$ ） 毛发湿度表（ $t < -10^{\circ}\text{C}$ ）	HMP155温湿传感器	每年4月汛期前检定一次
寿县	干湿球温度表（ $t \geq -10^{\circ}\text{C}$ ） 毛发湿度表（ $t < -10^{\circ}\text{C}$ ）	HMP 45D温湿传感器	每2年检定一次，视情况更换
贵阳	干湿球温度表（ $t \geq -10^{\circ}\text{C}$ ） 毛发湿度表（ $t < -10^{\circ}\text{C}$ ）	HMP 45D温湿传感器	每2年检定一次，视情况更换
格尔木	干湿球温度表（ $t \geq -10^{\circ}\text{C}$ ） 毛发湿度计（ $t < -10^{\circ}\text{C}$ ）	HMP 45D温湿传感器	每两年更换一次
张北	干湿球温度表（ $t \geq -10^{\circ}\text{C}$ ） 毛发湿度计（ $t < -10^{\circ}\text{C}$ ）	HMP 45D温湿传感器	温湿传感器共更换三次，日期分别是2008.7.21、2010.7.21、2012.7.6
长春	干湿球温度表（ $t \geq -10^{\circ}\text{C}$ ） 毛发湿度表（ $t < -10^{\circ}\text{C}$ ）	HMP 45D温湿传感器	每2年检定一次，视情况更换

5.2 数据预处理

5.2.1 原始观测资料质量分析

为了更好地开展后续数据分析工作，首先通过对原始数据的时间序列变化情况的研究，了解观测数据质量。对八个台站分别作了自动与人工相对湿度差值序列图（2007年1月1日～2013年12月31日），其中贵阳（2010年5月）、电白（2008年4月和09年5月）在时间序列图上存在跳变，如图5.2-1所示。其原因是由于仪器设备的更换造成的，其余站具有较好的时间序列一致性。针对这种跳变的现象，本报告在第三、四节将对跳变较明显的电白和贵阳站进行了分段统计。

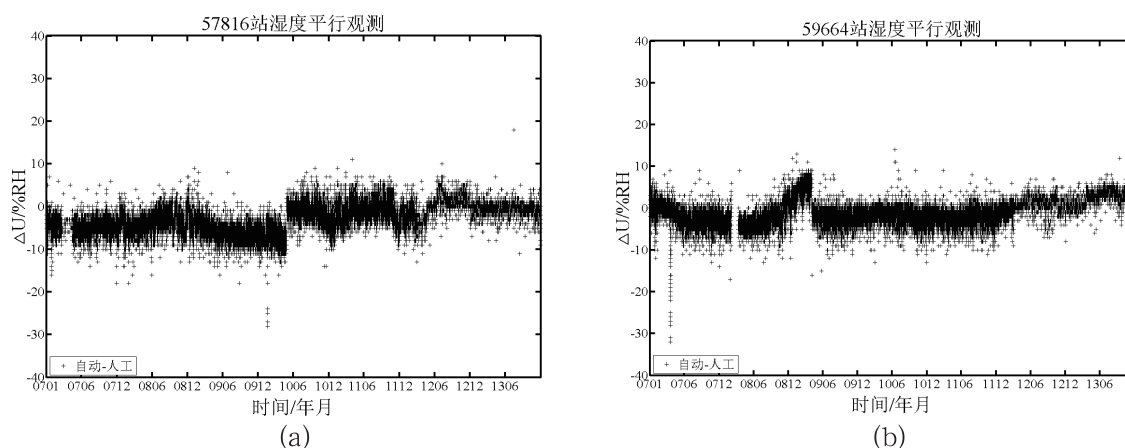
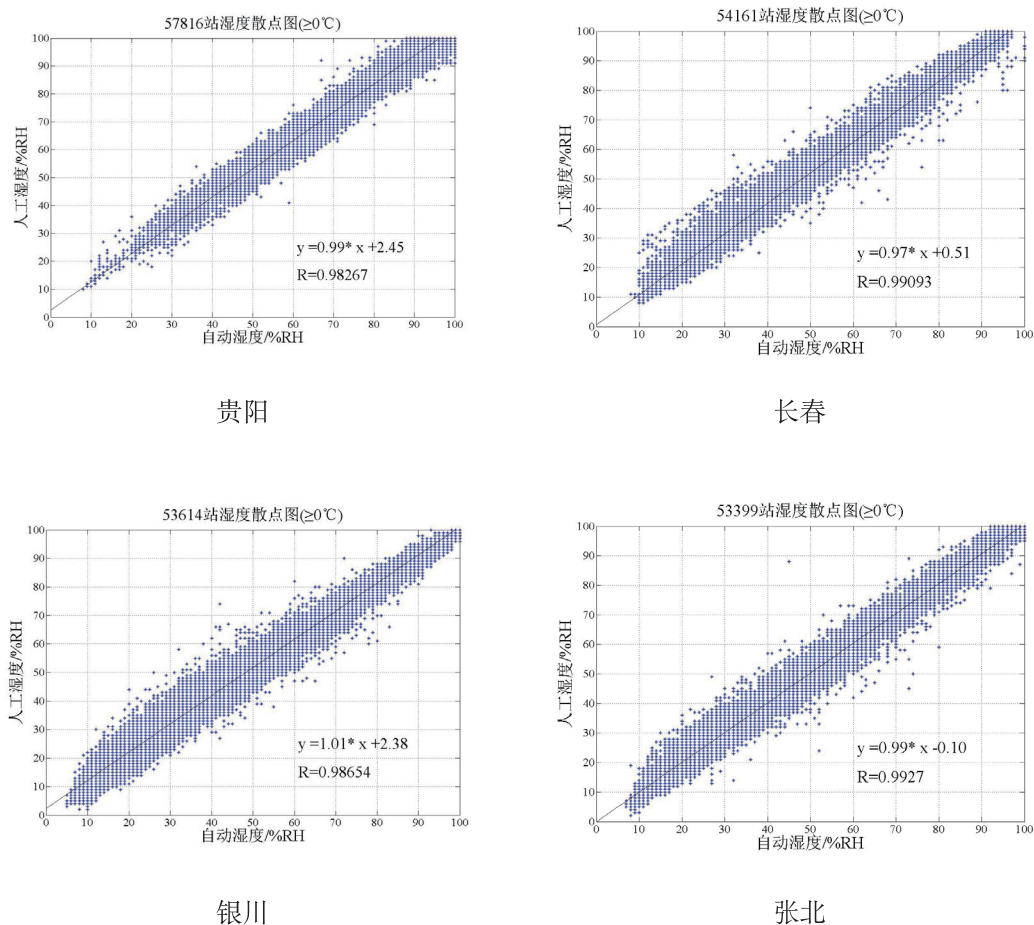
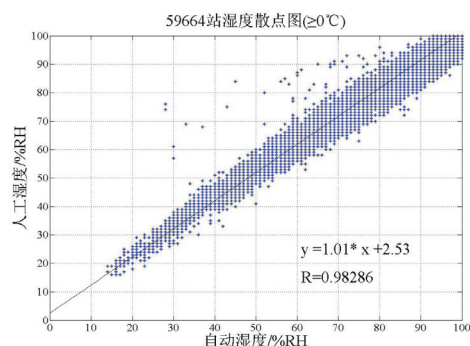


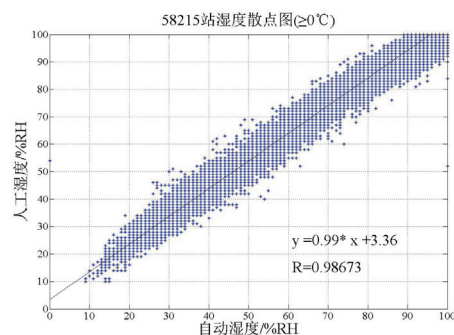
图5.2-1 自动与人工相对湿度差值序列图 (2007年1月1日~2013年12月31日)
(a) 贵阳, (b) 电白

为了进一步了解自动和人工湿度观测数据的关系, 绘制了2007年1月1日~2013年12月31日人工和自动相对湿度的散点图, 并对数据进行拟合, 结果见图5.2-2。

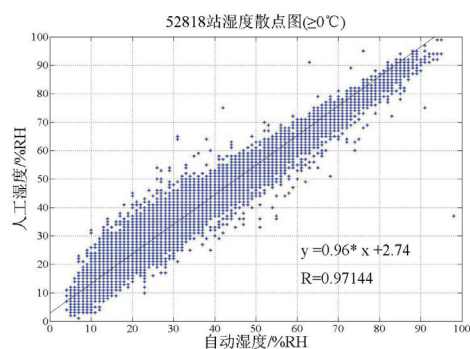




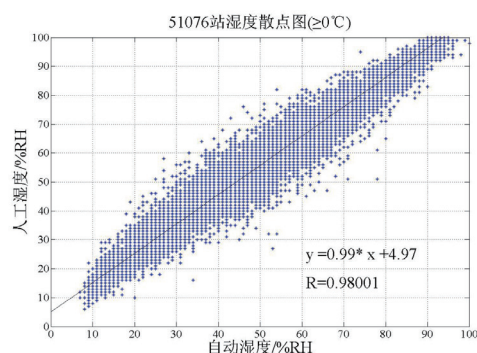
电白



寿县



格尔木



阿勒泰

图5.2-2 人工和自动相对湿度散点图

由图5.2-2可以看出，八个站的人工和自动湿度观测数据具有较好的数据相关性，相关系数在0.97 ~ 0.99；长春、银川、格尔木站的自动和人工相对湿度在低湿（ $< 30\% \text{RH}$ ）时相对离散，贵阳、电白、寿县站的自动和人工相对湿度在高湿（ $> 90\% \text{RH}$ ）时相对离散，阿勒泰站的自动和人工相对湿度在中等湿度（ $40 \sim 70\% \text{RH}$ ）时相对离散。

总体来看，八个站人工和自动观测湿度数据有一定的离散性，且有少量数据偏离拟合线较远，可能是人为因素或者仪器故障等原因造成的异常值，需要在数据分析之前首先剔除这些异常值。

5.2.2 剔除异常值

为避免在分析中使用有误的湿度观测数据，本试验采用“ 3σ 原则”进行异常值的剔除。所谓“ 3σ 原则”，即当 x 属于标准正态分布时， x 的取值有99.73%的可能性落在“均值加减三倍标准偏差”的范围之间。统计学上称为“ 3σ 原则”，用于全面质量管理。剔除判据为 $|x_i - \bar{x}| > 3s$ ，其

中 x_i 为样本值（本文为自动和人工湿度差值）， $\bar{x}$ 是 x_i 的均值，即系统偏差， s 是样本标准偏差。

由于“ 3σ 原则”仅适用于正态分布，所以在剔除前先对自动和人工湿度差值的频率分布情况进行了统计，见图5.2-3。可以看出，各站的湿度差值频率分布呈近似正态分布，因此可以采用“ 3σ 原则”进行异常值的剔除。

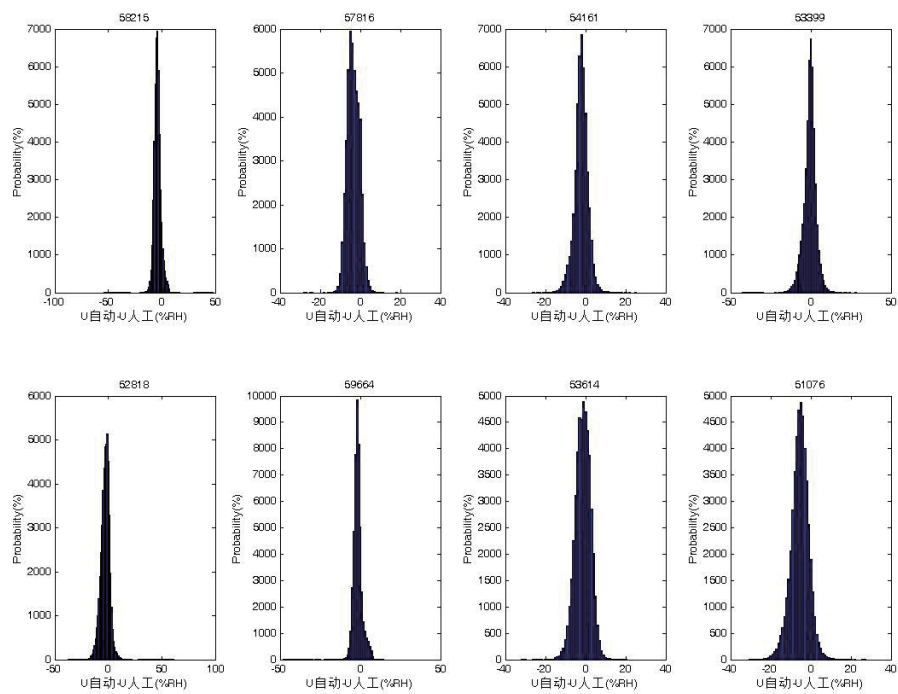


图5.2-3 频率分布图

表5.2-1 剔除异常值前后的数值比较（U自动-U人工）

试验台站	剔除个数 (比率%)	剔除前			剔除后		
		样本量	系统偏差%RH	标准偏差 /%RH	样本量	系统偏差%RH	标准偏差 /%RH
寿县58215	796 (1.83)	43501	-4.07	3.15	42705	-4.17	2.84
贵阳57816	129 (0.29)	44283	-3.5	3.07	44154	-3.5	3.02
长春54161	324 (1.10)	29468	-2.34	3.03	29144	-2.28	2.75
张北53399	150 (0.53)	28490	-0.32	3.04	28340	-0.34	2.87
格尔木52818	218 (0.77)	28203	-4.02	3.97	27985	-3.96	3.74
电白59664	1180 (2.50)	47146	-1.6	2.71	45966	-1.74	2.3
银川53614	251 (0.71)	35345	-1.78	3.85	35094	-1.72	3.68
阿勒泰51076	267 (0.91)	29154	-5.7	4.08	28887	-5.69	3.79
总体平均	-2.92	3.36		-2.93	3.12		



从表5.2-1可以看出,剔除异常值后,自动观测与人工观测湿度差值(以下简称“差值”)的标准偏差总体有所减小,总体平均值由3.36% RH降至3.12% RH,电白站的标准偏差由2.71%RH降至2.30%RH,寿县站由3.15%RH降至2.84%RH。

5.3 相对湿度比对分析

本研究通过统计不同湿度、温度、风速条件下的自动与人工观测相对湿度的比对差值,及其年、月、季的变化情况,分析造成自动和人工观测湿度差异的原因。由图5.2-2可知,电白(2008年4月和2009年5月)、贵阳(2010年5月)的时间序列图上存在明显的跳变,所以在统计分析时做了分段处理。其中:贵阳(时段1)代表2007年1月1日~2010年5月27日,贵阳(时段2)代表2010年5月28日~2013年12月31日;电白(时段1)代表2007年1月1日~2008年4月9日、2009年5月4日~2013年12月31日,电白(时段2)代表2008年4月10日-2009年5月3日。

5.3.1 高低湿条件下的比对

分别统计低湿条件下($U_{\text{人工}} \leq 80\%$)、高湿条件下($U_{\text{人工}} > 80\%$)的样本量、系统偏差和标准偏差,并对系统偏差进行显著性检验。其中:标准偏差的计算公式为: $s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$, $\bar{x}$ 代表比对差值的平均值,即系统偏差, i 为第 i 次的比对差值, N 为样本数。

高低湿比对差值统计结果见表5.3-1。

表5.3-1 高低湿比对差值统计结果(单位:%RH)

台站	U人工≤80%			U人工>80%			总计		
	样本数	系统偏差	标准偏差	样本数	系统偏差	标准偏差	样本数	系统偏差	标准偏差
贵阳(时段1)	12001	-5.04*	2.11	14989	-5.05*	2.49	26990	-5.05*	2.33
贵阳(时段2)	7198	-0.32	2.45	9966	-1.62*	1.96	17164	-1.07*	2.28
电白(时段1)	15208	-2.07*	2.24	22411	-1.6*	1.82	37619	-1.79*	2.02
电白(时段2)	3257	-1.06*	3.02	5090	-1.75*	3.42	8347	-1.48*	3.29
寿县	21949	-4.01*	2.94	20756	-4.33*	2.73	42705	-4.17*	2.84
长春	21599	-1.93*	2.93	7545	-3.27*	1.85	29144	-2.28*	2.75
张北	21995	-0.26	3.02	6345	-0.59*	2.29	28340	-0.34	2.87
银川	30975	-1.88*	3.78	4119	-0.57*	2.54	35094	-1.72*	3.68
阿勒泰	25458	-5.68*	3.89	3429	-5.76*	2.93	28887	-5.69*	3.79
格尔木	27559	-3.97*	3.76	426	-3.4*	2.58	27985	-3.96*	3.74

注:*表示通过0.05显著性水平检验

对八个台站的历史数据进行分析, 分析结果表明:

(1) 各试验站点在各种条件下比对差值的系统偏差在 $-0.34\% \sim -5.69\%RH$ 之间, 标准偏差在 $2.02 \sim 3.79\%RH$ 之间; 从八个站自动站和人工站湿度观测比对差值的总系统偏差看, 其值为负数, 即自动站测得的相对湿度偏低。系统偏差的显著性检验结果表明, 当 $\alpha=0.05$ 时, 除张北站总体和低湿情况、以及贵阳(时段2)低湿情况下未通过显著性检验, 其余站均通过显著性检验。这说明自动站相对湿度观测值因其传感器特性所致与人工观测值之间有系统性偏低现象。

(2) 张北站自动和人工观测相对湿度偏差最小, 阿勒泰站自动和人工偏差最大。

(3) 在高湿时, 贵阳(时段1)和阿勒泰站的系统偏差超过湿度观测最大允许误差的指标要求($\pm 5\%RH$, $> 80\%RH$); 低湿时, 贵阳(时段1)、寿县、阿勒泰的系统偏差也超过最大允许误差的指标($\pm 3\%RH$, $\leq 80\%RH$), 其余站均符合指标要求。由于人工观测也存在一定误差, 所以对个别站偏差较大的问题还需进一步研究。

5.3.2 湿度分段比对

为了进一步研究湿度的大小对自动人工观测差异的影响, 根据人工观测湿度将湿度分为六段进行统计分析, 分别是 <30 、 $30 \sim 50$ 、 $50 \sim 70$ 、 $70 \sim 80$ 、 $80 \sim 90$ 、 >90 ($\%RH$)。

表5.3-2 湿度分段结果 ($t>0^{\circ}C$) (单位: $\%RH$)

	人工观测湿度	样本数	系统偏差	标准偏差		人工观测湿度	样本数	系统偏差	标准偏差
	<30%	948	-2.58	2.79		<30%	127	-1.77	2.32
寿县	30%~50%	4568	-3.92	3.21	电白(时段1)	30%~50%	1108	-2.92	2.38
	50%~70%	8707	-3.89	2.95		50%~70%	6279	-2.26	2.24
	70%~80%	6903	-4.4	2.7		70%~80%	6876	-1.83	2.17
	80%~90%	9257	-4.31	2.75		80%~90%	10247	-1.36	1.97
	>90%	11240	-4.38	2.67		>90%	11746	-1.85	1.68
长春	人工观测湿度	样本数	系统偏差	标准偏差	电白(时段2)	人工观测湿度	样本数	系统偏差	标准偏差
	<30%	2733	-0.82	2.94		<30%	67	-2.16	2.26
	30%~50%	6414	-1.92	3.2		30%~50%	299	-2.03	2.37
	50%~70%	7930	-1.98	2.84		50%~70%	1344	-0.9	2.83
	70%~80%	4131	-2.5	2.46		70%~80%	1391	-0.99	3.24
	80%~90%	3911	-2.98	2.01		80%~90%	2109	-1.1	3.43
	>90%	3633	-3.55	1.64		>90%	2888	-2.19	3.37



(续表)

	人工观测湿度	样本数	系统偏差	标准偏差		人工观测湿度	样本数	系统偏差	标准偏差
	<30%					<30%			
贵阳(时段1)	30%~50%	218	-3.8	2.16	银川	30%~50%	8432	-1.38	3.49
	50%~70%	1533	-5.25	2.41		50%~70%	10616	-2.7	3.89
	70%~80%	5140	-5	2.18		70%~80%	8423	-1.68	3.9
	80%~90%	4549	-5.05	1.92		80%~90%	3207	-1.1	3.32
		6367	-5.22	2.02			2612	-0.63	2.83
	>90%	8469	-4.94	2.78		>90%	1547	-0.56	2.19
贵阳(时段2)	人工观测湿度	样本数	系统偏差	标准偏差	格尔木	人工观测湿度	样本数	系统偏差	标准偏差
	<30%					<30%			
	30%~50%	57	1	2.57		30%~50%	14104	-3.19	3.45
	50%~70%	795	0.44	2.76		50%~70%	9702	-5.19	3.93
	70%~80%	3164	-0.11	2.57		70%~80%	3107	-3.76	3.67
	80%~90%	2829	-0.69	2.17		80%~90%	602	-3.69	2.99
张北	人工观测湿度	样本数	系统偏差	标准偏差	阿勒泰	人工观测湿度	样本数	系统偏差	标准偏差
	<30%					<30%			
	30%~50%	4289	-1.26	1.86		30%~50%	3642	-4.3	3.05
	50%~70%	5640	-1.88	2.01		50%~70%	9979	-6.13	3.76
	70%~80%	5387	0.19	2.83		70%~80%	8443	-5.73	4.25
	80%~90%	7119	-0.68	3.2		80%~90%	3141	-5.76	3.82
张北	人工观测湿度	样本数	系统偏差	标准偏差	阿勒泰	人工观测湿度	样本数	系统偏差	标准偏差
	<30%					<30%			
	30%~50%	6172	-0.22	3.04		30%~50%	2243	-5.82	3.41
	50%~70%	2994	-0.2	2.74		50%~70%	1262	-5.62	2.23
	80%~90%	3287	-0.13	2.44		80%~90%			
	>90%	2961	-1.07	2.06		>90%			

图5.3-1为湿度分段系统偏差结果图。

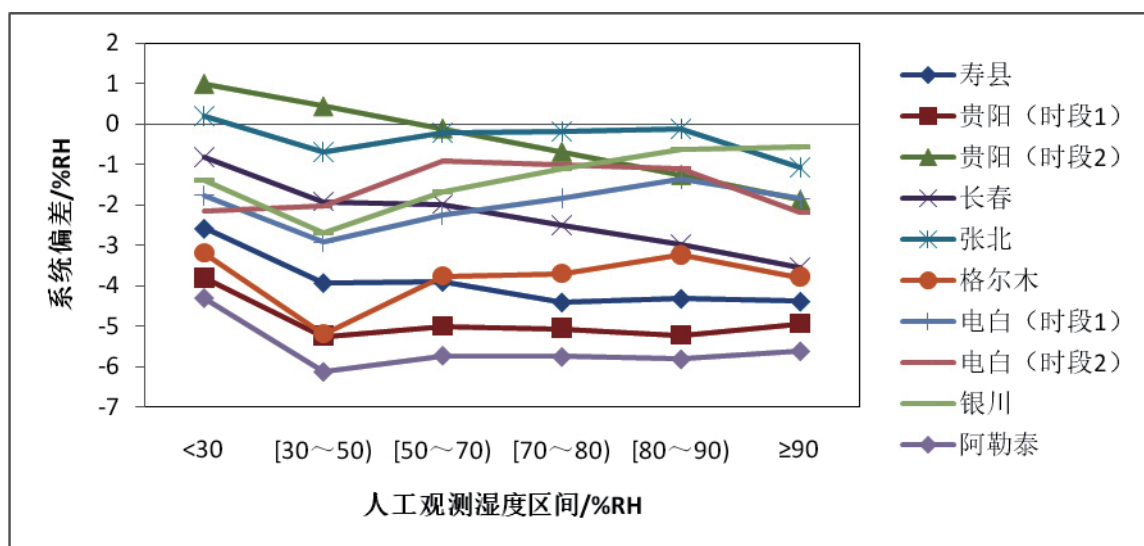


图5.3-1 湿度分段系统偏差结果图

湿度分段的结果中可以看出：湿度<30%RH时两种观测的偏差较小；湿度为30%~50%RH时各站自动与人工的偏差增大，系统偏差大多在-6.13%~0.44%RH以内；湿度>50%RH时，系统偏差未见明显变化规律。显著性检验的结果表明，当 $\alpha=0.05$ 时，各站不同湿度分段情况下的样本序列有92%通过显著性检验。

5.3.3 不同风速条件的分段比对

干湿表对相对湿度的观测会受到周围环境风速的影响。实际应用中，在观测条件下的水汽压是用下述的半经验的干湿表公式来计算的：

$$e' = e'_w(p, t_w) - Ap(t - t_w) \tag{1}$$

式中， e' 是在气压为 p ，湿球温度为 t_w 时相对于纯水水平面或纯冰水平面的饱和水汽压， p 是大气压力， t 是干球温度， A 是干湿表系数，湿球上为水和冰时其值不同。干湿表系数 A 还取决于干湿表（特别是湿球系统）的设计，取决于流过湿球的气流速率（称为通风速度）。图5.3-2为干湿表常数 A 与风速的关系。在通风速度较低时， A 显著地受通风速度的影响；而在通风速度为3m/s~5m/s（对常规尺度的温度表而言）或更高时， A 值实质上就不再随通风速度而变化。

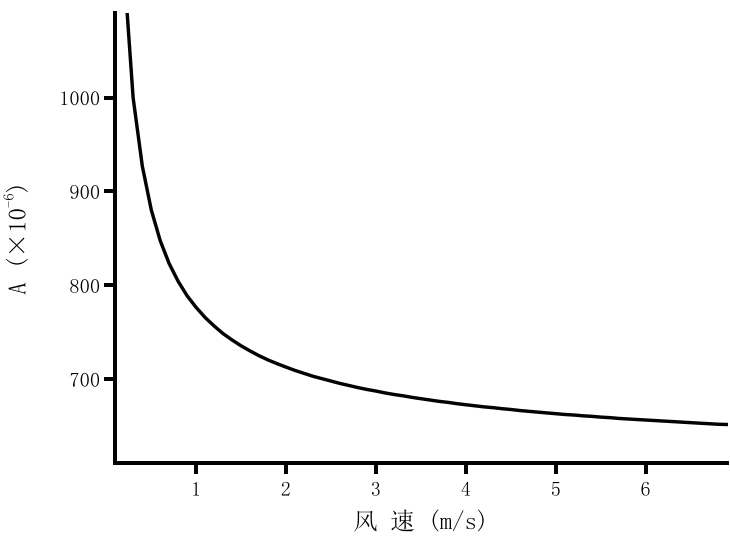


图5.3-2 干湿表常数A与风速的关系

为了分析风速对湿度观测的影响，将风速分为6段（0~2、2~3、3~4、4~5、5~6、>6m/s），统计不同风速下自动站观测的湿度与人工观测的系统偏差情况，结果如见表5.3—3所示。



表5.3-3 风速分段结果 (U自动-U人工 t>0℃) (单位: %RH)

台站	风速 (自动 站)/m/s	样本数	系统偏差	标准偏差	台站	风速 (自动 站)/m/s	样本数	系统偏差	标准偏差
寿县	0~2	17853	-4.79	2.88	格尔木	0~2	13373	-5.5	3.64
	2~3	11631	-4.08	2.69		2~3	6975	-3.39	3.11
	3~4	6912	-3.7	2.72		3~4	4147	-2.35	3.1
	4~5	3564	-3.3	2.69		4~5	2005	-1.47	3.1
	5~6	1626	-2.98	2.71		5~6	952	-0.72	3.05
	>6	1021	-2.57	2.76		>6	483	-0.28	3
贵阳(时 段1)	0~2	10269	-5.33	2.42	电白(时 段1)	0~2	8865	-2.3	1.99
	2~3	8329	-5.05	2.3		2~3	10810	-1.86	2.01
	3~4	5096	-4.79	2.23		3~4	8306	-1.65	2
	4~5	2213	-4.68	2.15		4~5	5454	-1.46	1.95
	5~6	752	-4.42	2.06		5~6	2731	-1.31	1.93
	>6	306	-4.21	2.36		>6	1263	-1.15	2
贵阳(时 段2)	0~2	6487	-1.44	2.19	电白(时 段2)	0~2	2086	-2.28	3.13
	2~3	5696	-1	2.2		2~3	2371	-1.31	3.19
	3~4	3274	-0.73	2.37		3~4	1743	-1.23	3.28
	4~5	1218	-0.52	2.36		4~5	1186	-1.14	3.46
	5~6	379	-0.61	2.5		5~6	609	-1.08	3.45
	>6	91	-1.38	3.05		>6	314	-1.18	3.27
长春	0~2	9174	-3.14	2.5	银川	0~2	20806	-2.24	3.67
	2~3	7071	-2.42	2.56		2~3	7963	-1.37	3.5
	3~4	5189	-1.92	2.67		3~4	3612	-0.8	3.42
	4~5	3420	-1.57	2.81		4~5	1527	-0.34	3.69
	5~6	2005	-1.44	2.94		5~6	671	0.12	3.57
	>6	2151	-0.91	3.05		>6	470	0.52	3.8
张北	0~2	8595	-1.4	2.79	阿勒泰	0~2	16191	-6.54	3.84
	2~3	5509	-0.53	2.66		2~3	6141	-5.53	3.44
	3~4	4858	0	2.63		3~4	2900	-4.42	3.24
	4~5	4009	0.3	2.7		4~5	1657	-3.64	3.12
	5~6	2462	0.72	2.76		5~6	1020	-3.1	2.99
	>6	2741	0.85	3.11		>6	921	-2.68	3.27

图5.3-3为风速分段系统偏差结果图。

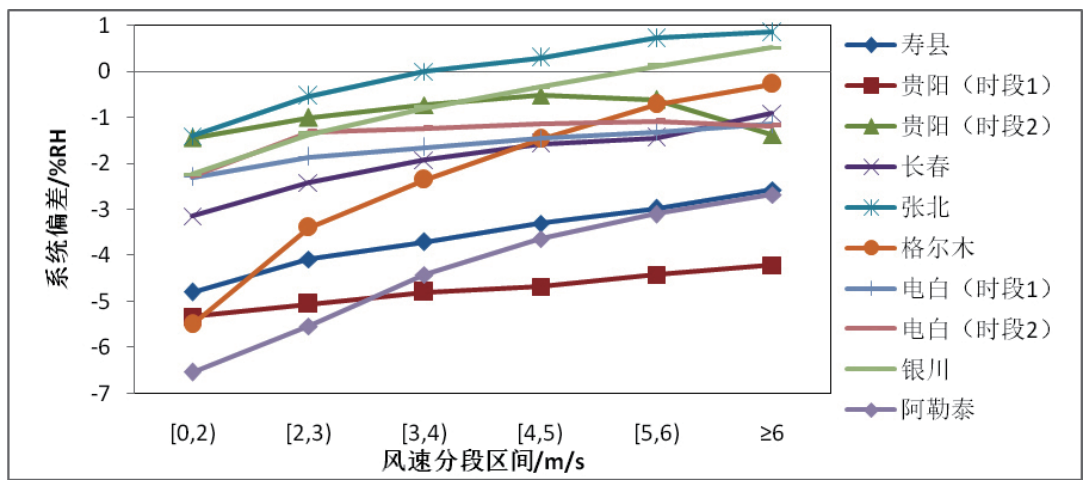


图5.3-3 风速分段系统偏差结果图 (U自动-U人工)

风速分段系统偏差的结果图表显示：在低风速下自动和人工相对湿度观测间的系统偏差较大；除贵阳（时段2）外的其余站，随着风速增大，自动站和人工站偏差逐渐减小，各站系统偏差变化幅度在1.12% ~ 5.22%RH之间。显著性检验结果表明，当 $\alpha=0.05$ 时，所有台站在风速为0 ~ 2m/s范围内均通过显著性检验，随着风速增大，各台站未通过检验的情况逐渐增多，这说明在低风速下两类观测的偏差显著。

分析可能造成低风速下自动和人工偏差较大的原因：本试验的八个台站的人工观测均为百叶箱干湿表，箱体削弱了外界自然风的作用。所以，在周围空气流动不畅的情况下，干湿表湿球水分蒸发受阻，空气湿度的观测数据偏高是正常现象。另外，风速很小时，由于A值处于不稳定段，其观测结果也极不稳定，风速稍有波动就会造成较大的误差。

5.3.4 不同气温条件下的分段比对

湿敏电容传感器是根据空气湿度变化引起两极板间介质材料的介电常数变化测量湿度的。但环境温度的变化也会引起介质材料的介质介电常数的变化，从而给湿度测量结果带来附加误差。定量测出环境温度变化对湿度传感器测量值的影响，是湿度传感器研发和气象观测人员最为关心的问题。尽管在实际测量时，湿度的测量结果都进行温度修正，但修正总是不完善的。

为了研究气温变化对自动和人工湿度观测差异的影响，本试验对气温进行分段，分为0 ~ 15℃、15 ~ 30℃、>30℃三段，统计不同气温下自动与人工观测相对湿度差值的系统偏差和标准偏差，结果见表5.3-4所示。



表5.3-4 气温分段结果（U自动-U人工）（单位：%RH）

台站	气温（自动站）/℃	样本数	系统偏差	标准偏差
寿县	>30	2599	-5.5	2.59
	15~30	21355	-4.22	2.73
	0~15	18281	-4.05	2.81
贵阳（时段1）	>30	84	-6.96	2.38
	15~30	14266	-5.04	2.22
	0~15	12249	-5.15	2.34
贵阳（时段2）	>30	126	-0.75	2.46
	15~30	8923	-0.42	2.02
	0~15	7541	-1.96	2.29
长春	>30	359	-3.71	3.18
	15~30	16169	-2.51	2.63
	0~15	12589	-1.93	2.85
张北	>30	147	-1.45	2.14
	15~30	12285	-0.27	2.61
	0~15	15880	-0.38	3.06
格尔木	>30	59	-5.03	2.71
	15~30	9944	-4.3	3.28
	0~15	17978	-3.77	3.96
电白（时段1）	>30	2894	-2.85	2.23
	15~30	29699	-1.69	1.94
	0~15	4723	-1.86	2.07
电白（时段2）	>30	609	-3.67	1.98
	15~30	6613	-1.78	3.2
	0~15	693	0.85	2.42
银川	>30	1305	-2.75	3.16
	15~30	17723	-1.88	3.6
	0~15	16003	-1.47	3.77
阿勒泰	>30	663	-6.94	3.53
	15~30	14446	-6.17	3.57
	0~15	13760	-5.13	3.94

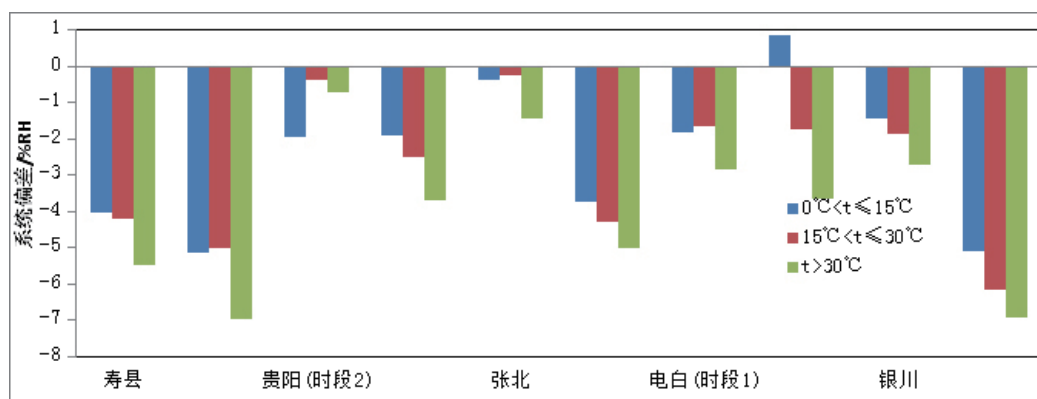


图5.3-4 不同温度条件下两种观测仪器测得的相对湿度差值（U自动-U人工）

从图5.3-4的结果可以看出：随着气温的升高，自动站与人工站相对湿度偏差的绝对值有逐渐增大的趋势（贵阳（时段2）除外）。气温在0~15℃与15~30℃这两段差异不明显，气温从15~30℃升为30℃以上时，自动与人工相对湿度的偏差明显增大，增大幅度约为2%RH。这说明高温环境会对相对湿度的观测造成影响，而且随着温度升高自动站观测偏干现象越明显。显著性检验结果表明，当 $\alpha=0.05$ 时，各站在不同气温分段条件下有80%的样本序列通过显著性检验。

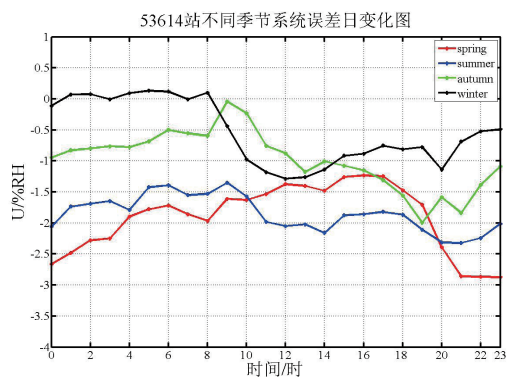
5.3.5 时间差异和系统偏差日变化

为了研究两类观测在时间滞后上的差异，统计了八个站2007年1月1日~2012年4月1日的自动和人工观测相对湿度小时数据的日变化情况（由于2012.4.1之后每日仅4个时次观测，可能给逐时结果带来偏差，未用于该项统计），结果表明：（1）两类观测的时间同步性较好，未有明显的时间滞后差异；（2）自动观测相对湿度偏低与人工观测；（3）一天中相对湿度的变化呈单峰单谷型，清晨06时左右湿度最大，下午15时左右湿度最低。

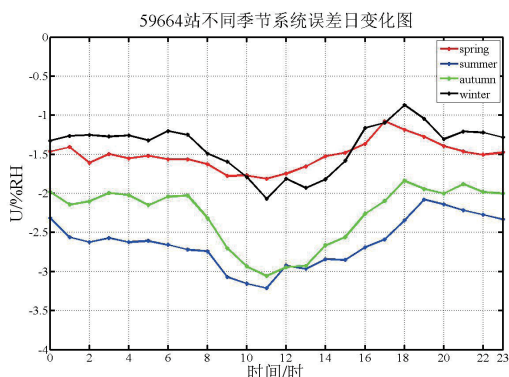
同时，对自动和人工观测相对湿度的系统偏差进行了日变化分析，结果显示：下午相对湿度低时，自动和人工观测的差值更趋近于0，即系统偏差均较小。清晨相对湿度较高时，分两种情况：（1）气候湿润地区的台站（寿县、贵阳、长春、张北），其相对湿度的日均值最高均在75%以上，这些站在清晨高湿时，自动和人工观测的偏差也较大，且自动站观测偏干，电白站除外。（2）气候干燥地区的台站（格尔木、银川、阿勒泰），其相对湿度的日均值最高均在70%以下，这些站在清晨时自动与人工观测偏差没有明显增大。其原因可能是因为气候湿润地区的台站中午过后随着辐射增强湿度降低，湿度<30%RH的样本量增加，根据5.3.2节的分析结果两种观测的偏差变小。

5.3.6 不同季节湿度差值日变化

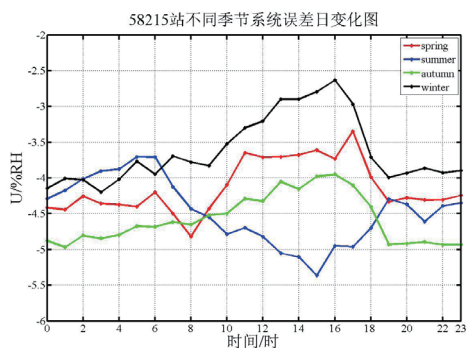
按照气象上常用的季节划分方式，将3~5月、6~8月、9~11月、12月~来年2月划分为春、夏、秋、冬四季，统计不同季节湿度差值日变化情况。不同季节湿度差值日变化情况见图5.3-5冬季样本过少，统计时包含了 $t<0^{\circ}\text{C}$ 的数据。由前面章节可知，寿县、贵阳、电白、格尔木、银川站气温低于 -10°C 的样本数量较少甚至为零，而阿勒泰、张北、长春站有较多低于 -10°C 的样本，毛发湿度表的观测可能导致这些台站冬季不同的变化规律。因此，对于冬季日变化曲线（图5.3-5中的黑线）应按低温样本量的多少将台站分两类进行讨论。



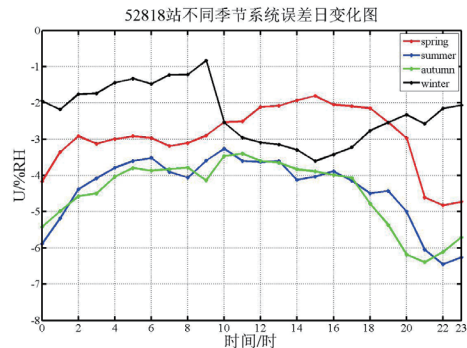
银川



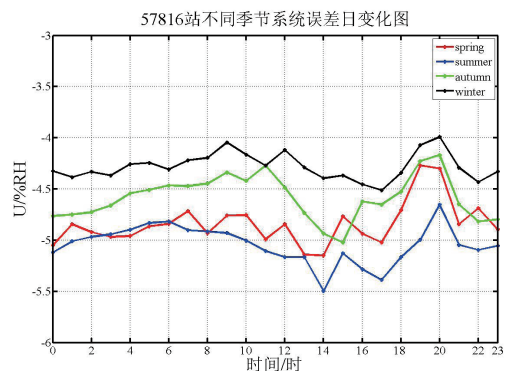
电白



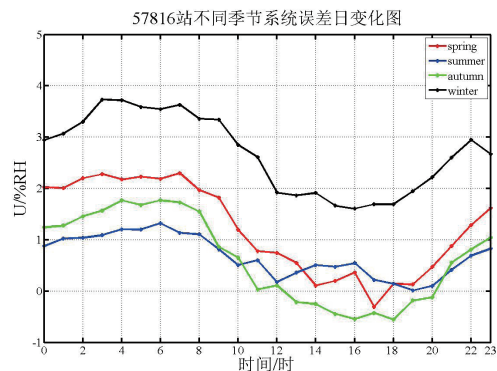
寿县



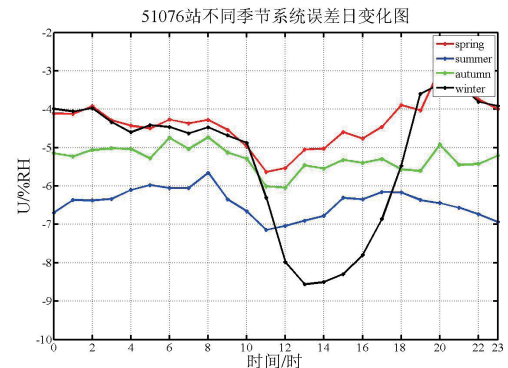
格尔木



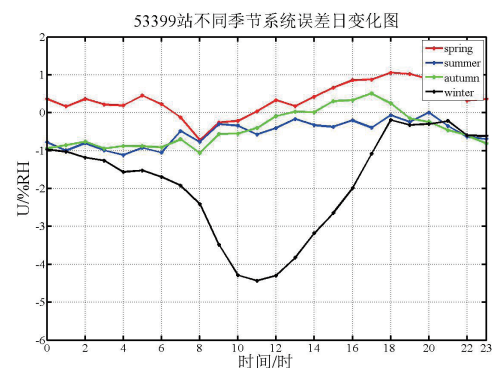
贵阳 (时段1)



贵阳 (时段2)



阿勒泰



张北

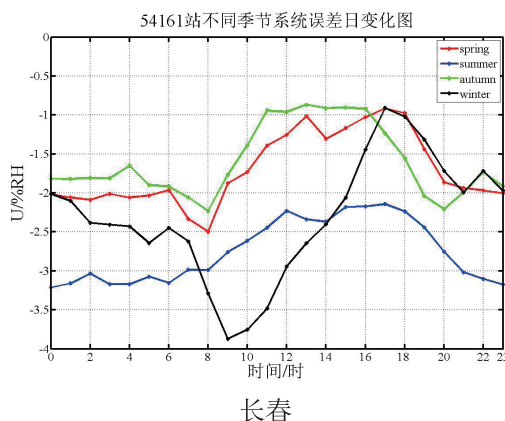


图5.3-5 系统偏差日变化图
($U_{\text{自动}} - U_{\text{人工}}$, 春季: 红线, 夏季: 蓝线, 秋季: 绿线, 冬季: 黑线)

由图5.3-5: (1) 夏季自动与人工湿度观测比对差值 (蓝线) 幅度大于春季 (红线) 和秋季 (绿线), 即夏季两种观测数据的差异最大。分析其原因可能是由于湿敏电容夏季容易长期处于高湿状态, 会对观测造成一定的影响。(2) 冬季, 气温低于 -10°C 样本较少的台站 (寿县、贵阳、电白、格尔木、银川站), 自动与人工湿度观测比对差值 (黑线) 幅度小于其余季节, 即冬季两种观测数据的差异相比其余季节最小; 而气温低于 -10°C 样本较多的台站 (阿勒泰、张北、长春站), 冬季系统误差的日变化呈单谷型, 且变化幅度较大, 在中午左右两种观测数据的差异最大。这说明毛发湿度表的相对湿度观测可能存在较大误差。

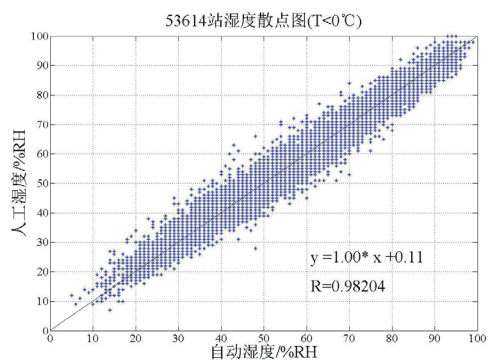
针对低温环境下自动和人工相对湿度观测存在较大差异这一问题, 本报告在5.4节专门对气温低于零度的资料进行了比对分析。

5.4 气温低于零度以下时的资料比对分析

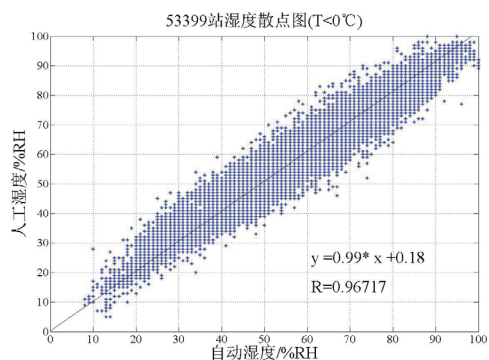
由于《规范》中规定百叶箱干湿表在气温 $0^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 时溶冰观测, 气温低于 -10°C 时换用毛发湿度表, 气温低于零度的湿度观测可能存在较大误差, 所以本节单独对气温低于零度以下时的资料进行分析。电白站没有气温低于零度的样本, 所以未对该站进行统计。

5.4.1 散点拟合图

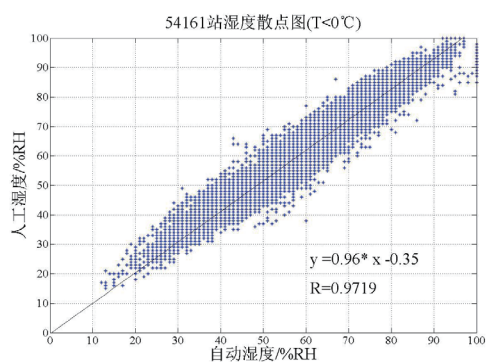
绘制了气温低于零度时, 2007年1月1日~2013年12月31日人工和自动相对湿度的散点图, 并对数据进行拟合, 见图5.4-1



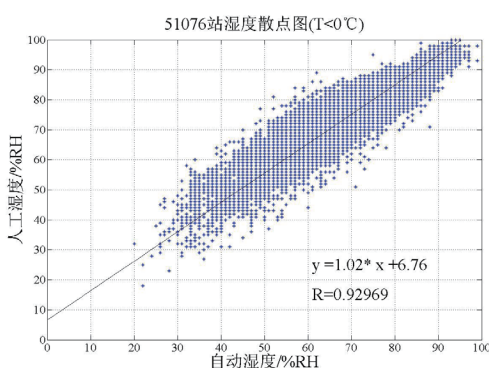
银川



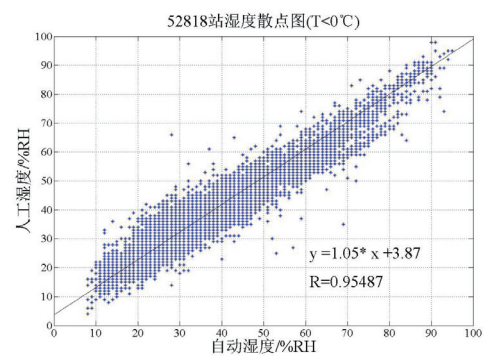
张北



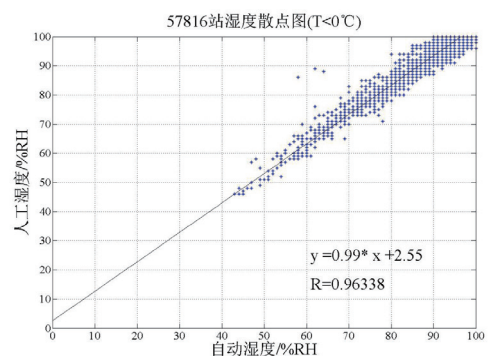
长春



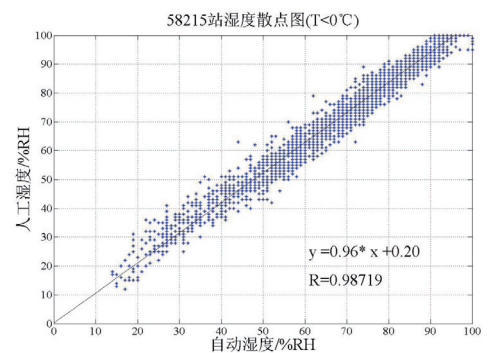
阿勒泰



格尔木



贵阳



寿县

图5.4-1 气温低于0℃时,各站散点拟合图

由图5.4-1，气温低于零度时，各站的人工和自动湿度观测数据具有较好的相关性，相关系数在0.93 ~ 0.99；阿勒泰站样本分布较为离散；贵阳、寿县站气温低于零度的样本较少。

5.4.2 高低湿条件下的比对

分别统计气温低于零下时，低湿条件下（ $U_{\text{人工}} \leq 80\%RH$ ）、高湿条件下（ $U_{\text{人工}} > 80\%RH$ ）的样本量、系统偏差、标准偏差，结果见表5.4-1

表5.4-1 比对差值统计结果（ $t < 0^{\circ}C$ ，单位：%RH）

台站	U人工 $\leq 80\%RH$			U人工 $> 80\%RH$			总计		
	样本数	系统偏差	标准偏差	样本数	系统偏差	标准偏差	样本数	系统偏差	标准偏差
寿县	1741	-2.57★	3.05	1303	-4.19★	2.31	3044	-3.27★	2.87
贵阳	323	-3.45★	2.76	2069	-3.42★	2.61	2392	-3.42★	2.63
长春	13951	-1.65★	3.61	3380	-3.15★	3.29	17331	-1.94★	3.6
张北	15865	-0.75★	4.23	2948	-1.95★	3.89	18813	-0.94★	4.2
格尔木	12930	-2.28★	3.93	130	-1.06★	3.32	13060	-2.26★	3.93
银川	10300	-0.08	3.63	1758	-0.24	3.08	12058	-0.1	3.56
阿勒泰	10274	-5.46★	5.14	7571	-4.64★	4.01	17845	-5.11★	4.71

注：★表示通过0.05显著性水平检验

气温低于零度时，高低湿比对差值的统计结果表明：（1）各试验站点比对差值的系统偏差在-0.1% ~ -5.11%RH之间，对系统偏差进行显著性检验结果表明，当 $\alpha = 0.05$ 时，除了银川站总体样本、高湿、低湿样本均未通过显著性检验，其余站均通过显著性检验，说明自动站观测显著偏低；（2）各站的系统偏差均符合相对湿度的允许误差指标要求（ $\pm 3\%RH$ ， $\leq 80\%RH$ ； $\pm 5\%RH$ ， $> 80\%RH$ ），贵阳、阿勒泰低湿情况除外。银川站自动和人工观测相对湿度偏差最小，阿勒泰站自动和人工偏差最大。（3）寿县、长春、张北、银川站，高湿时比对差值的系统偏差比低湿时小；贵阳、格尔木、阿勒泰站，高湿时比对差值的系统偏差比低湿时大。

5.4.3 气温分段结果

将气温分为-10 ~ 0℃、-20 ~ -10℃、<-20℃三段，统计不同气温下自动与人工观测相对湿度差值的系统偏差和标准偏差，结果见表5.4-2所示。

表5.4-2 气温分段结果（U自动-U人工 $t < 0^{\circ}\text{C}$ ）（单位：%RH）

台站	气温（自动站）/ $^{\circ}\text{C}$	样本数	系统偏差	标准偏差
长春	-10~0	8374	-1.33	3.05
	-20~-10	7366	-2.29	3.95
	<-20	1451	-3.7	3.82
张北	-10~0	9939	0.02	3.59
	-20~-10	6958	-1.42	4.52
	<-20	1792	-4.32	3.96
格尔木	-10~0	10306	-2.84	3.72
	-20~-10	2663	-0.1	3.93
	<-20	8	3.88	4.58
银川	-10~0	9327	-0.26	3.48
	-20~-10	2605	0.43	3.79
	<-20	60	1.78	1.5
阿勒泰	-10~0	7873	-3.67	4.43
	-20~-10	6722	-5.3	4.53
	<-20	3127	-8.35	4.05

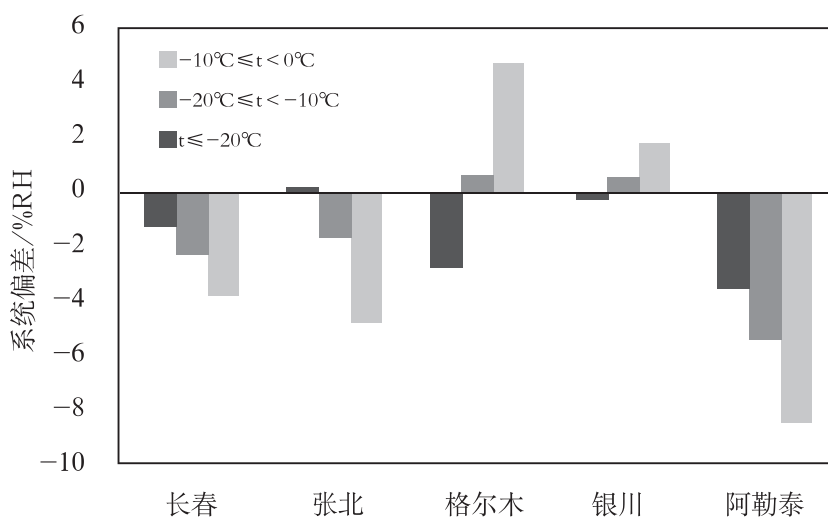


图5.4-2 不同温度下两种观测仪器测得的相对湿度差值

从图5.4-2的结果可以看出：气温低于零度时，各站的系统偏差有正有负，这与气温高于零度时的变化规律有所不同；随着气温的降低，自动站与人工站的系统偏差逐渐偏离零点；气温在0~-10℃与-10~-20℃这两段差异不明显，气温降至-20℃以下时，自动与人工相对湿度系统偏差的绝对值明显增大。这说明低温的环境会对相对湿度观测造成影响。显著性检验结果表明，当 $\alpha=0.05$ 时，各站在不同气温分段条件下有60%的样本序列通过显著性检验。

5.4.4 风速分段结果

将风速分为6段（0~2、2~3、3~4、4~5、5~6m/s），统计气温低于零度时，不同风速下自动站观测的湿度与人工观测的系统偏差情况，结果见表5.4-3所示。

表5.4-3 风速分段结果 ($U_{\text{自动}} - U_{\text{人工}} \ t < 0^{\circ}\text{C}$) (单位: %RH)

台站	风速 (自动站) /m/s	样本数	系统误差	标准偏差
寿县	0~2	1833	-3.6	2.79
	2~3	630	-2.59	2.72
	3~4	300	-2.71	3.33
	4~5	146	-3.1	3.18
	5~6	68	-3.15	2.4
	>6	61	-3.46	2.77
贵阳	0~2	786	-3.65	2.48
	2~3	752	-3.51	2.7
	3~4	543	-3.12	2.66
	4~5	228	-3.18	2.69
	5~6	72	-3.17	2.69
	>6	4	-2.75	2.99
长春	0~2	6028	-2.15	3.59
	2~3	4794	-1.96	3.65
	3~4	3149	-1.93	3.72
	4~5	1827	-1.61	3.51
	5~6	840	-1.44	3.29
	>6	649	-1.46	3.26
张北	0~2	7194	-0.45	4.17
	2~3	3204	-0.7	3.94
	3~4	2707	-1.02	4.02
	4~5	2053	-1.52	4.19
	5~6	1527	-1.6	4.31
	>6	2015	-1.82	4.59
格尔木	0~2	8876	-2.24	3.89
	2~3	2582	-2.32	3.91
	3~4	1057	-2.32	4.09
	4~5	351	-2.32	4.31
	5~6	125	-2.4	4.52
	>6	61	-2.51	4.07
银川	0~2	8755	-0.12	3.56
	2~3	2176	0.15	3.5
	3~4	692	0.06	3.55
	4~5	247	-0.49	3.81
	5~6	104	-1.57	3.36
	>6	79	-2.76	3.14
阿勒泰	0~2	14668	-5.34	4.72
	2~3	2153	-4.39	4.5
	3~4	558	-3.56	4.5
	4~5	197	-3.81	4.97
	5~6	113	-2.73	4
	>6	139	-2.91	3.96



从气温低于零度时的风速分段结果中未发现明显规律。

5.4.5 时间差异和系统偏差日变化

为了分析自动观测和毛发湿度表观测在时间滞后上的差异，统计了2007年1月1日~2012年4月1日气温 $<-10^{\circ}\text{C}$ 时阿勒泰、张北、长春、银川四个站（由于电白、寿县、贵阳、格尔木站气温低于 -10°C 的样本较少甚至为零，无法绘制完整的日变化图）自动和人工观测相对湿度的日变化情况。结果显示：1.毛发湿度表观测相对湿度的日最小值出现的时间与自动观测相比存在一定的滞后，约滞后1~2h；自动观测和毛发湿度表观测的日最大值较为接近。2.除银川站两类观测较为接近，其余站自动观测相对湿度偏低于毛发湿度表观测。

同时，还进行了系统偏差日变化分析。由上节的分析可知，气温低于零度时，相对湿度的观测偏差随气温的降低而增加，这个规律与毛发湿度表的测量误差相一致。为了进一步了解毛发湿度表的观测特性，分析了阿勒泰、张北、长春、银川四个站的系统偏差的日变化，并与自动观测气温的日变化进行比较。结果显示，气温 $<-10^{\circ}\text{C}$ 时自动观测与毛发湿度观测差值呈单谷型日变化，中午12时前后两种观测偏差最大。分析其原因，用毛发湿度表（湿度计同）测湿时，为了获得较正确的湿度记录，毛发湿度表的读数须用订正图法加以订正，而毛发湿度表的系统偏差与制作订正图时的温度有关。各站制作的订正图较接近于低温使用条件，但各站的气温在12时左右迅速升高，订正图不再适用使得毛发湿度表测量值偏高，因此日变化呈现单谷波形。

5.5 主要结论

本试验通过选取在统一观测场、具有不同感应仪器的两种地面相对湿度观测系统（自动站观测和人工观测）所获取的全年平行观测的相对湿度数据进行了统计分析，得到如下主要结论。

（1）总体分析来看，自动站相对湿度的观测结果系统性低于人工观测结果，且随着湿度的增加逐渐增大，两者系统偏差在 $-0.1\% \sim -5.69\%\text{RH}$ ，标准偏差在 $2.02 \sim 3.39\%\text{RH}$ 之间。湿度 $<30\%\text{RH}$ 时两者差异较小，系统偏差在 $-3.8\% \sim 1\%\text{RH}$ 之间；湿度 $>30\%\text{RH}$ 各站自动与人工的差异增大，其中在 $30\% \sim 50\%$ 之间差异变化幅度较大，其系统偏差大多在 $-6.13\% \sim 0.44\%\text{RH}$ ；湿度 $>50\%\text{RH}$ 系统偏差变化幅度较平缓，大多在 $-6\% \sim 0.6\%\text{RH}$ 之间。

（2）两类观测逐小时数据未见明显的时间差异；自动和人工相对湿度观测偏差的日变化为：清晨相对湿度较高时，高湿地区台站偏差较大，下午相对湿度低时，偏差较小；季节变化规律是夏季自动和人工相对湿度观测偏差最大；冬季，气温 $<-10^{\circ}\text{C}$ 样本较少的台站，相比其余季节最小，而气温 $<-10^{\circ}\text{C}$ 样本较多的台站，由于受到毛发湿度表观测误差的影响，在中午左右

偏差较大。

(3) 自动与人工相对湿度观测间的偏差与风速有关。当气温高于零度时, 在低风速 ($< 3\text{m/s}$) 下偏差较大, 随着风速增大, 两者偏差逐渐减小, 减小幅度在 $1.13\% \sim 3.86\%\text{RH}$ 之间。这是因为人工观测使用的百叶箱干湿表, 在通风速度较小时, 干湿表系数显著地受通风速度的影响, 而湿度计采用固定的干湿表系数造成的。

(4) 气温对相对湿度观测有一定影响。气温低于 30°C 时, 自动与人工相对湿度间的偏差不明显, 气温升为 30°C 以上时, 自动与人工相对湿度间的偏差明显增大, 增大幅度约为 $2\%\text{RH}$, 而且随着温度升高自动站观测偏干现象明显; 气温降至 -20°C 以下时, 自动与人工相对湿度间的偏差也明显增大。

5.6 问题和建议

5.6.1 问题

本报告所用资料来自8个国家基准站, 百叶箱干湿表、毛发湿度表测量相对湿度自身存在一些问题, 湿敏电容的测试性能亦尚有不足之处, 关于仪器情况的背景资料也较难完全掌握。因此, 本报告所得出的结论虽然能说明一些问题, 但尚不够全面, 可能存在一定的局限性。

5.6.2 建议

- (1) 做好对湿敏电容的维护和定期检定, 可有效提高观测数据的质量。
- (2) 对湿敏电容在低温下的测试性能尚须进行深入测试和试验。

6 不同湿度传感器对比试验*

摘 要：本试验对比分析不同湿度传感器性能，检验地面业务观测使用的湿度传感器及新型湿度传感器的性能。参试设备为通风干湿表（TFS-1）、可调谐半导体激光吸收光谱技术的湿度传感器（TDLAS型）和电容薄膜湿度传感器（HMP155A）。对比试验从2014年7月至2014年11月持续5个月，资料分析表明：数字通风干湿表需经常维护，可靠性较差；TDLAS型湿度传感器误测率较高、稳定性较差，需改进；HMP155A温湿度传感器数据较稳定，但数据数值偏低。

6.1 背景和目的

空气湿度是表示空气中的水汽含量和潮湿程度的物理量，在日常的观测业务中，一般用露点温度、水气压和相对湿度等来表示空气湿度。相对湿度是气象观测重要的气象要素之一，其测量数据的质量对于天气预报、地面测报等工作都有至关重要的作用。为促进新型湿度传感器技术的发展，同时检验地面业务观测使用的湿度传感器的性能，于2014年7月至2014年11月开展了不同技术体制湿度传感器的对比试验。试验的仪器有国瑞智TFS-1型数字通风干湿表、航天易联半导体激光吸收光谱技术的TDLAS型湿度传感器和维萨拉聚合电容薄膜式的HMP155A型湿度传感器。

6.1.1 参试仪器

（1）国瑞智TFS-1型数字通风干湿表

国瑞智TFS-1型数字通风干湿表（以下简称TFS-1）为国瑞智产品，测温元件采用铂电阻（Pt100），分辨力为0.01℃，相对湿度测量范围为10%RH~100%RH，分辨力为0.1%RH，通过RS-232与上位机通讯，由上位机通过命令集显示干、湿球温度、输入的气压值、干湿表常数等。图6.1-1为TFS-1传感器外形及其内部结构。

*本报告执笔人：郭然，莫月琴，阳艳红，陈挺

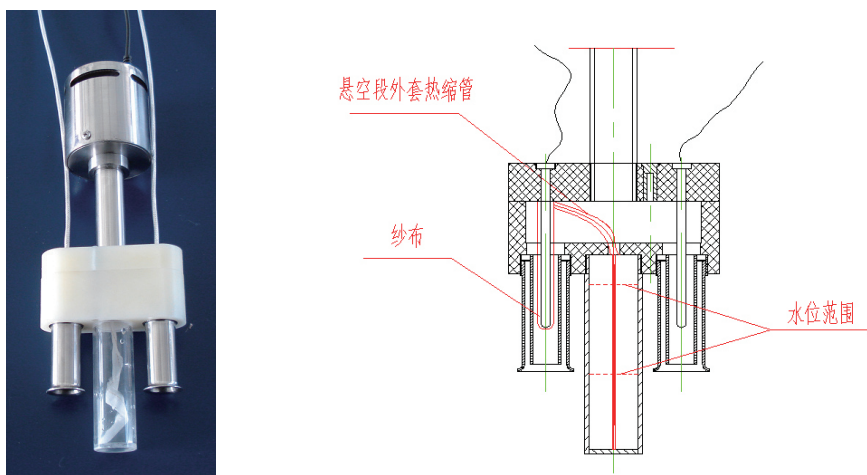


图6.1-1 国瑞智TFS-1型数字通风干湿表

（2）航天易联TDLAS型湿度传感器

航天易联TDLAS型湿度传感器（以下简称TDLAS）采用TDLAS（可调谐半导体激光吸收光谱）技术，利用激光能量被气体分子“选频”吸收形成吸收光谱的原理来测量空气中的水汽浓度。探头与主机用光缆连接，可以直接测量绝对湿度和温度。仪器的测量范围为10ppm ~ 60000ppm，相对湿度分辨力为1%RH。通过RS-232与上位机通讯。图6.1-2为TDLAS分体式传感器。

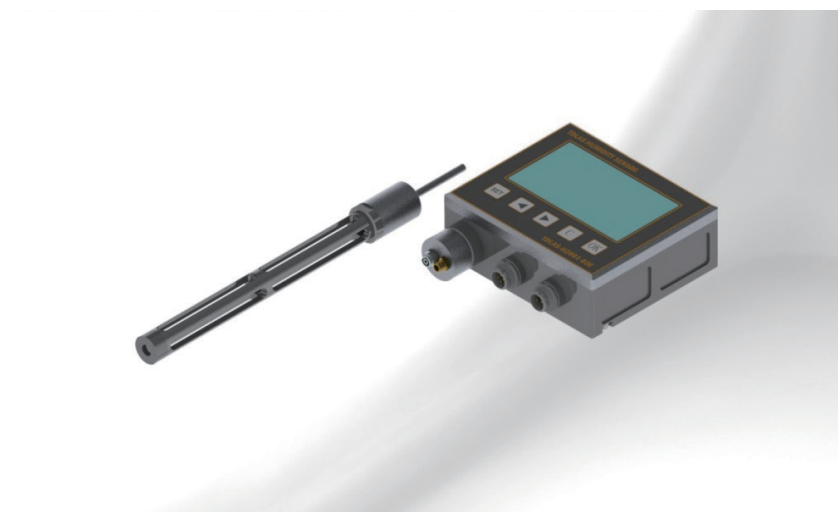


图6.1-2 航天易联TDLAS型湿度传感器

（3）维萨拉HMP155A型湿度传感器

维萨拉HMP155A型湿度传感器（以下简称HMP155A）是地面观测业务上使用的相对湿度传感器，该探头采用了聚合电容薄膜传感器来测量相对湿度，湿度测量范围涵盖0 ~ 100%RH，分辨力为1%RH。图6.1-3为HMP155A型湿度传感器。



图6.1-3 维萨拉HMP155A型湿度传感器

6.1.2 试验方法

(1) 比对参考仪器

此次对比试验使用的比对参考仪器是罗卓尼克（Rotronic）巡检仪（以下简称巡检仪），使用前已经过国家气象计量站校准，相对湿度测量量程为0 ~ 100%RH，测量精度为 $\pm 0.8\%$ RH，分辨力为0.01%RH，下位机使用罗卓尼克便携式七通道温湿度巡检仪，存储介质为256MCF存储卡。图6.1-4为罗卓尼克巡检仪。



图6.1-4 罗卓尼克巡检仪

(2) 试验方案

对比试验从2014年7月15开始，至2014年11月5日结束，历时四个月。试验过程中，将参考仪器与被试仪器安装在同一个玻璃钢百叶箱（如图6.1-5），以1分钟为间隔采集数据。四种仪器处于同一高度（高约1.5m），试验前对各传感器进行了计量检定，均符合技术指标要求。TFS-1与TDLAS通过RS-232串口线缆与串口服务器相连，实现与上位机的串行通讯，测量数据

以文本文件形式实时地存储到上位机中。HMP155A测量数据通过ISOS软件导出并存储至上位机中。参考仪器（巡检仪）的测量数据均以文本文件形式实时存储在CF卡中。由于巡检仪是实验室仪器，不适合长时间在室外环境中工作，因此，巡检仪的试验时间并不连续，累计试验时间共41438分钟，即得到试验数据41438组。其他参试仪器均连续采样。

试验期间有专人巡视、检查、维护设备，如为TFS-1添水、换纱布，开启巡检仪、导出CF卡存储数据等。

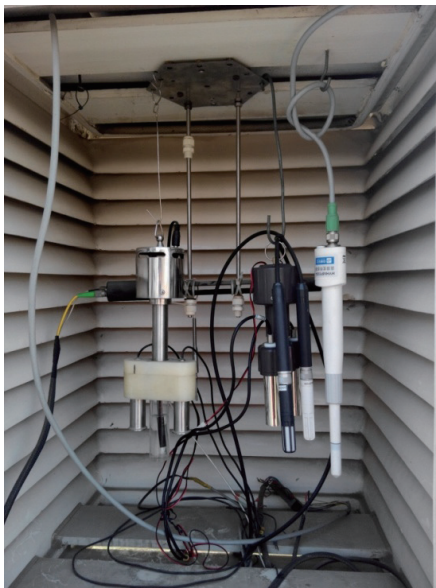


图6.1-5 参试传感器安装示意图

6.2 数据质量分析

对比试验中，四台仪器的所有测量数据如图6.2-1所示，其中蓝色线条为巡检仪湿度数据，红色线条为TFS-1湿度数据，绿色线条为TDLAS湿度数据，紫色线条为HMP155A湿度数据。

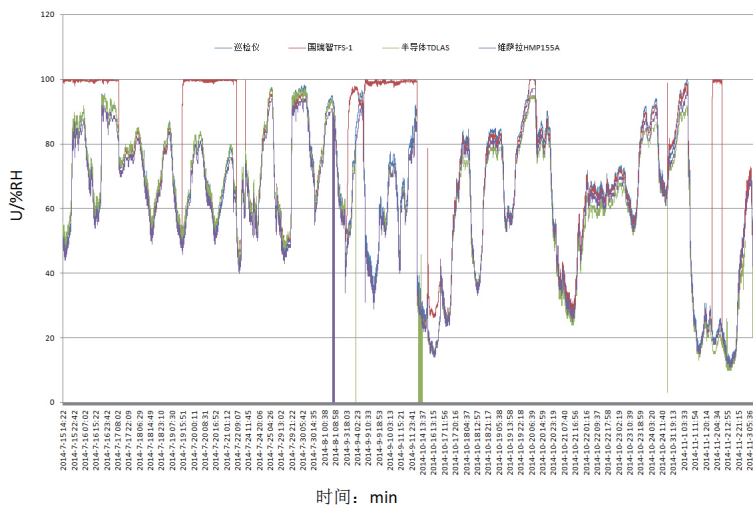


图6.2-1 试验数据对比分析



TFS-1与TDLAS试验数据存在较为严重的缺测和误差，具体缺测和误测数如下表6.2-1所示。

表6.2-1 各设备缺测与误测数据个数

	国瑞智TFS-1	航天易联TDLAS	维萨拉HMP155A
缺测	1906	4386	18
误测	8345	1727	0

TFS-1与TDLAS都为新开发的仪器，缺测和误测的原因可能为：

- (1) 内部嵌入式软件的原因导致缺测；
- (2) 通讯传输线路受到干扰导致缺测；
- (3) 综合集成硬件控制器通讯问题导致数据未能及时传输至上位机；
- (4) 上位机软件文本文件存储问题导致数据丢失；
- (5) 人为原因将设备断电导致缺测。

上述原因均会导致设备缺测，设备连续长时间的缺测可能是由设备供电、维护等问题引起；而数据短时间内间断性缺测则可能是设备内部嵌入式软件问题导致的，通过实验记录无法判断缺测具体原因，因此，数据缺测问题在此不多赘述。

TFS-1误测数据非常多，特别是多次出现接近100%RH的相对湿度。主要是因为没有对试验设备进行及时维护，上水杯缺水、纱布被污染导致数据误测。根据式(1)、(2)进行湿度数据分析。

$$E = E_{tw} - A \times p_h (t - t_w) \dots \dots \dots (1)$$

$$U = (E / E_w) \times 100\% \dots \dots \dots (2)$$

式中，E为当前空气的水汽压，t为干球温度（℃），tw为湿球温度（℃），Etw为湿球温度tw所对应纯水平液面上的饱和水汽压，Ew为干球温度t所对应纯水平液面上的饱和水汽压，上水杯缺水、纱布被污染等，均会导致湿球纱布蒸发量减少，湿球温度tw近似等于干球温度t，如式(1)所示，有 $E \approx E_{tw} \approx E_w$ ， $U \approx 100\%$ ，因此TFS-1测量相对湿度几乎为100%，即图6.2-1上红色线条接近100%的情况。再对应试验人员记录的换水、换纱布等试验记录可知，TFS-1误测大部分情况都是由于维护不及时导致的。现举例说明，如图6.2-2所示，在2014年11月2日凌晨1点左右TFS-1出现了数据异常现象，11月2日上午通过及时加水、换纱布，9点左右测量数据逐渐恢复正常。

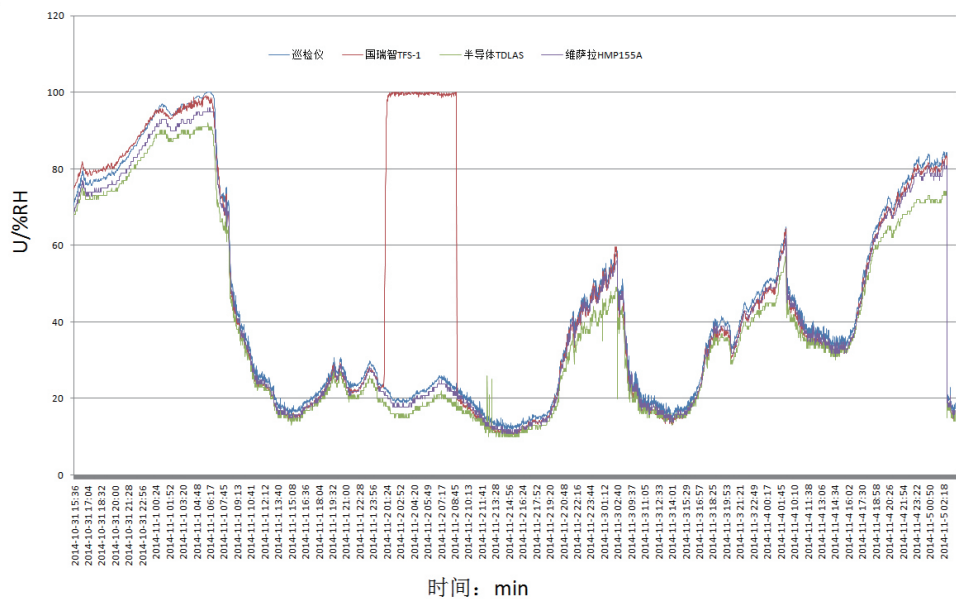


图6.2-2 TFS-1数据异常（示例）

根据表6.2-2可知，11月2日上午8：50至9：10更换纱布，因此测量数据恢复正常。

表6.2-2 试验记录（部分）

6	2014/10/30	8:50	8:52	加水	探测中心	赵宇
7	2014/10/31	13:42	13:46	加水	探测中心	王志成
8	2014/11/2	8:50	9:10	加水、换纱布	探测中心	赵宇、王志成
9	2014/11/3	9:30	9:33	加水	探测中心	赵宇
0	2014/11/4	9:22	9:30	加水	探测中心	王志成、赵宇

由于北京空气较为干燥，TFS-1上水杯中的水经常需要一天一加；北京空气质量较差，湿球纱布很快就会被污染，因此设备维护工作相当频繁，但仍然会出现由于人为失误导致的设备误测。

TDLAS的误测数据也很多，且大多集中在11月份。经过技术人员检查，维护和调试，发现误测问题的原因是设备嵌入式软件问题。

6.3 数据分析

剔除设备误测数据，同时剔除其他设备对应的的数据，保证四种传感器测量的相对湿度具有可比性，得到26458组有效数据，如图6.3-1所示。其中蓝色线条为巡检仪湿度数据，红色线条为TFS-1湿度数据，绿色线条为TDLAS湿度数据，紫色线条为HMP155A湿度数据。可以看到各传感器的测量数据趋势较为一致。

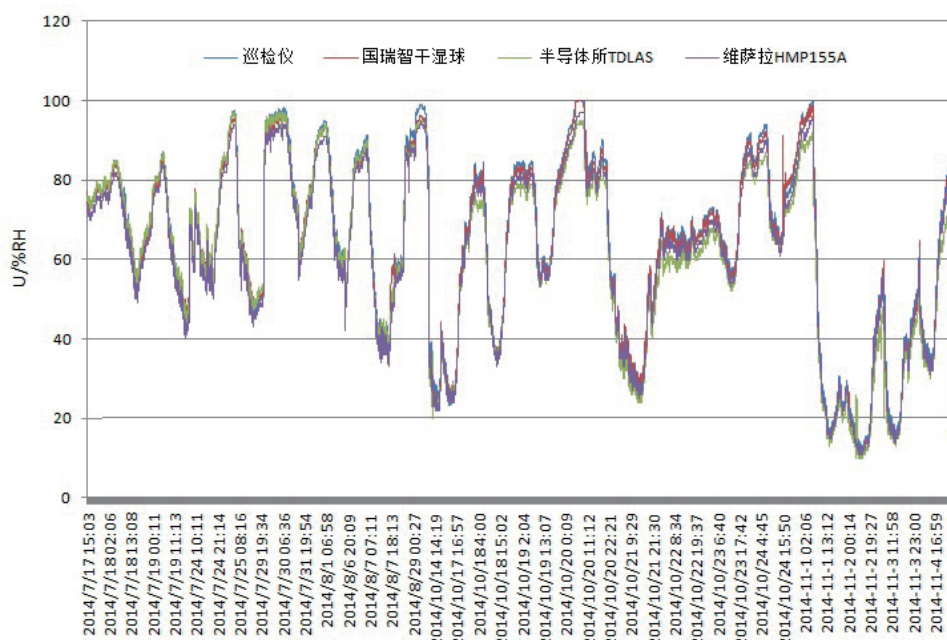
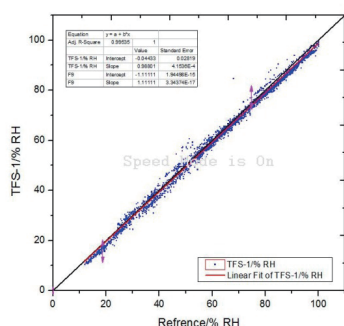
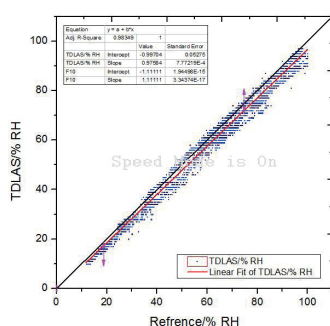


图6.3-1 试验有效数据比对

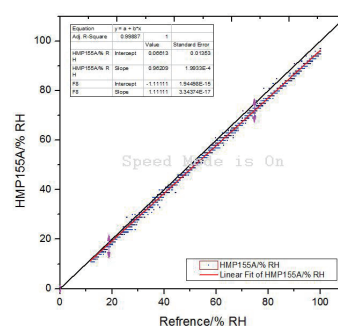
各设备测量数据的散点图及线性拟合结果如图6.3-2所示。其中（A）为TFS-1测量数据的散点图，（B）为TDLAS测量数据的散点图，（C）为HMP155A测量数据的散点图。



(A) TFS-1散点图



(B) TDLAS散点图



(C) HMP155A散点图

图6.3-2 参试设备测量数据散点图及线性拟合结果

通过将三种参试湿度传感器测量数据与参考仪器测量数据进行一致性分析，三组观测数据相关系数分别为0.99535、0.98349、0.99887，其中HMP155的拟合结果最好，TDLAS的数据离散程度相比其他两组数据离散程度较大。从分析结果可以看出，由于TFS-1的维护问题，偏离拟合线的离散点比较多。TDLAS和HMP155A在高湿时，测量值低于巡检仪。另外，TDLAS和HMP155A的分辨力较低，在图（B）和（C）中能明显的看出来。

三种参试传感器测量结果分别减去相同时次巡检仪的测量结果，得到每个传感器各次测量值的误差（如图6.3-3）。

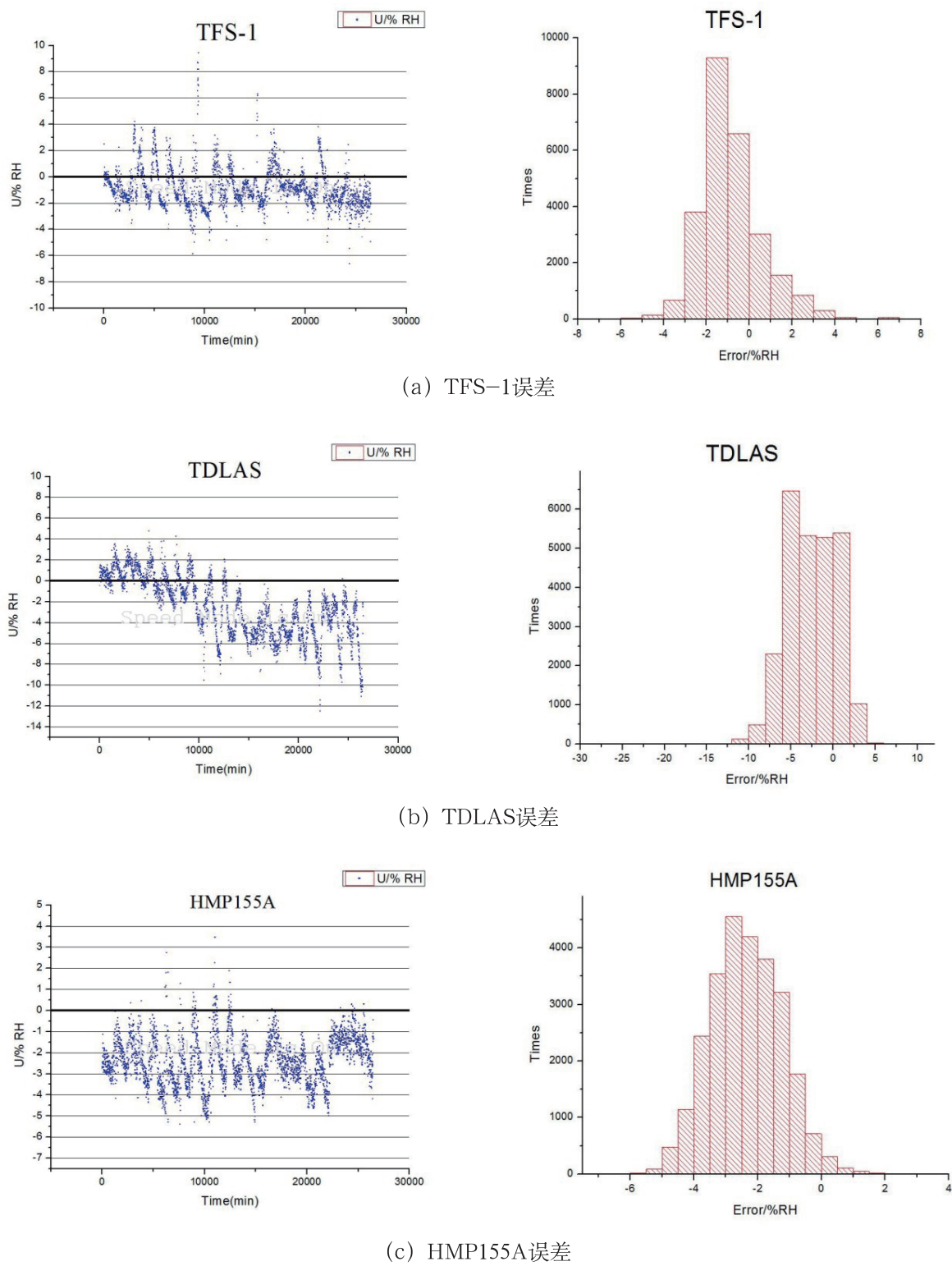


图6.3-3 参试设备湿度测量数据误差



根据各设备测量数据误差，TFS-1有94.5%的测量数据误差在-3%RH ~ +3%RH之间，TDLAS有94.0%的测量数据误差在-7%RH ~ 2%RH之间，HMP155A有95.2%的测量数据误差在-4.5%RH ~ -0.1%RH之间。结合图6.3-3，可以看到TFS-1测量数据误差较为稳定；TDLAS的测量数据在试验初期（7月中旬至8月中旬）误差较小，数据较为稳定，但是在对比试验的后半段（8月中旬至11月上旬）测量数据稳定性产生较大变化，误差变大，且测量数据较参考仪器测量数据偏低；HMP155A的测量数据较参考仪器测量数据普遍偏低，这与“相对湿度人工与自动观测资料对比分析报告”中的结论相一致。

统计各测量数据的相对误差（如图6.3-4）。

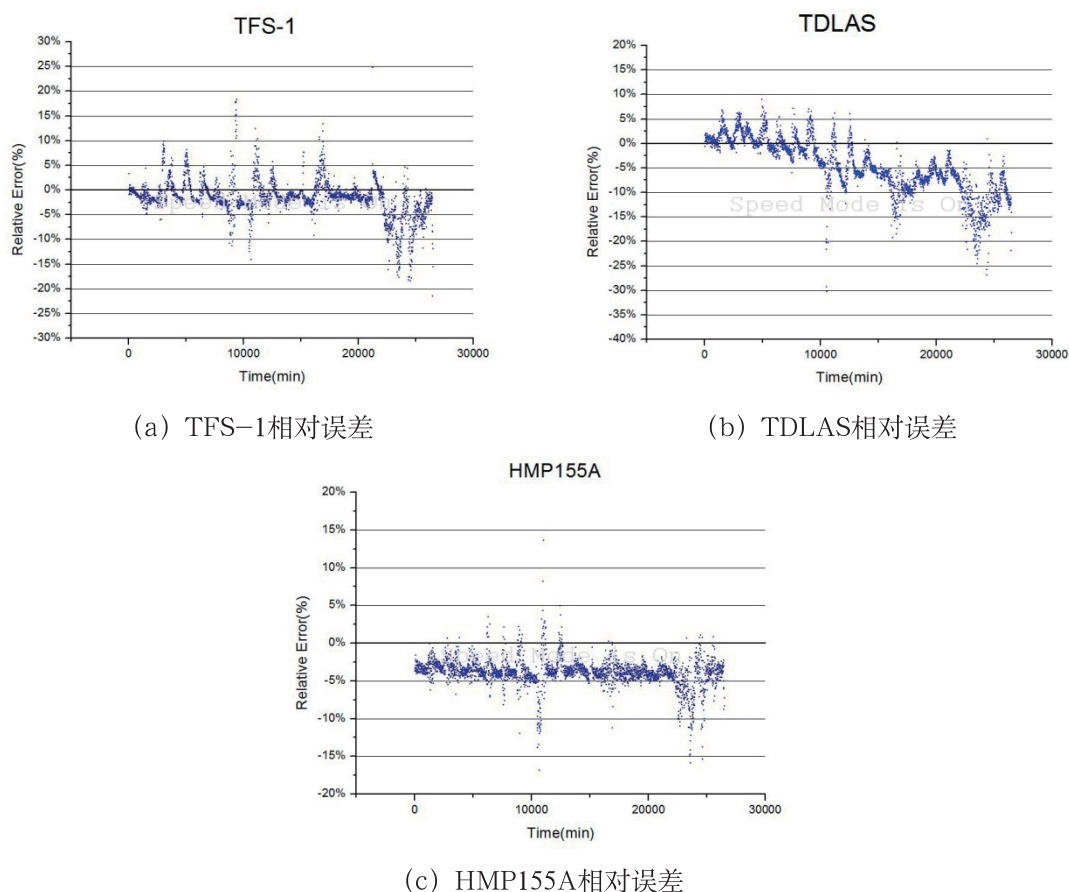


图6.3-4 参试设备湿度测量数据相对误差

通过相对误差分析可以看出HMP155A的测量数据相对来说比较稳定，但HMP155A的测量数据比巡检仪的测量数据偏低约2% ~ 5%（相对误差）。TFS-1测量数据的变化幅度较大；TDLAS的测量数据在实验后半段数据变化幅度较大。

分别统计低湿条件下（ $U \leq 80\%RH$ ）、高湿条件下（ $U \geq 80\%RH$ ）的样本量、系统误差和

标准偏差。由于各设备的测量数据误差频率分布呈近似正态分布，因此可以采用“3σ原则”剔除粗大误差，控制数据质量。剔除粗差后，统计各参试设备测量数据的系统误差和标准偏差。系统误差和标准偏差的计算公式分别为下式（3）、（4）。

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \tag{3}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \tag{4}$$

其中 X_i 为各次测量数据的误差值， $i=1,2,3\cdots,n$ ， n 为测量次数； $\bar{X}$ 为系统误差； S 为标准偏差。系统误差为一组误差的平均值，用于表示该组误差的散布中心；用标准偏差表示一组误差以系统误差为中心的散布范围。统计结果如表6.3-1所示。

表6.3-1 高低湿对比统计结果

设备型号	U<=80%			U>=80%			总计		
	样本数	系统误差	标准偏差	样本数	系统误差	标准偏差	样本数	系统误差	标准偏差
TFS-1	18529	-0.5323	1.6370	7666	-1.4729	1.0524	26195	-0.8115	1.5484
TDLAS	18349	-2.0449	2.8027	7654	-3.7242	2.7983	26003	-2.5434	2.9045
HMP155A	18604	-1.8840	0.9134	7853	-3.4884	0.6949	26457	-2.3603	1.1257

通过上表我们可以看出，低湿条件下各设备的测量数据相比高湿条件下的测量数据较稳定，根据地面测量相对湿度传感器性能指标“高湿条件下观测准确度±5%，低湿条件下观测准确度±3%”的要求，剔除粗差后的三台参试设备均符合观测要求。其中HMP155A的测量数据标准偏差最小，数据散布范围较小，数据波动较小。

6.4 试验结论与讨论

（1）TFS-1型数字通风干湿表

国瑞智TFS-1型数字通风干湿表属于传统湿度测量技术，保证正常的日常维护，TFS-1的测量是比较准确和较为稳定的，有94.5%的测量误差在-3%RH~+3%RH之间。测量数据与巡检仪测量数据一致性较好，线性拟合相关系数为0.99535。但是由于设备维护不够，TFS-1有效测量数据量最少。对比试验前半段，空气温度较高，上水杯中的纯水蒸发较快，因此7、8、9月添加纯水的频率几乎是两天一次，如果当天风速稍大，添水频率甚至可以达到半天一次。由于北京空气质量较差，湿球纱布容易被污染，更换湿球纱布的频率能达到三天一次（理论上是一周更换一次纱布）。这种情况在10月下旬至11月份有所好转。



（2）TDLAS湿度传感器

航天易联TDLAS湿度传感器属于电磁辐射吸收技术体制的传感器，线性拟合相关系数为0.98349，在对比试验前半段，TDLAS的测量数据比较稳定，误差范围大多在-2%RH~2%之间，数据质量相比其他两种传感器测量数据较好，但是在试验的后半段数据质量有所下降，说明TDLAS至也需要定期维护。相对其他两种传感器的测量数据来说TDLAS数据较为离散，剔除粗差后标准偏差也相对较大。总体来看，TDLAS有两个缺点：

1）误测率较高，且大多集中在11月份。针对这一问题，试验期间联系过厂家技术人员到试验场地进行维护调试，结合误测的数据分析原因，发现是设备软件BUG导致误测：当温度低于0℃时，设备测量温度显示为-x℃，但是当温度升至0℃以上时，温度数据的“-”依然保留，导致内部计算错误。

2）试验后半段TDLAS的测量数据明显偏低。TDLAS的传感器探测气室结构示意图如图6.4-1所示。



图6.4-1 TDLAS气室结构图

发射端与接收端之间为光线传播，在光线接触到的空气中的水汽时发生吸收，通过吸收的强度判断水汽即湿度。但若发射端与接收端之间有异物遮挡，将对吸收的曲线造成影响，从而影响湿度的测量结果。因此需要定期维护，清除如小昆虫、蜘蛛网、树叶等遮挡气室光路的异物；也可以在传感器探头外加装透气性能好的防尘罩。

（3）HMP155A温湿度传感器

维萨拉HMP155A温湿度传感器是地面观测业务上使用的湿度传感器，测量数据与巡检仪测量数据一致性较好，线性拟合相关系数为0.99887，有95.2%的测量误差在-4.5%RH~-0.1%RH之间，测量数据稳定，数据质量相比其他两种传感器测量数据较好。HMP155A的主要问题是测量数据偏低，这与“相对湿度人工与自动观测资料对比分析”的结论相一致。

7 防辐射罩与百叶箱对温度测量影响试验*

摘 要：本试验对不同厂家生产的通风防辐射罩与百叶箱的防辐射性能进行对比分析，目的是探寻防辐射罩和不同百叶箱对温度资料的影响。试验地点：中国气象局大气探测试验基地（北京南郊），本报告资料分析时间：2014年3月1日至5月31日。分析表明：对于自然通风防辐射罩，尺寸大、层数多的防辐射罩防止太阳辐射的效果会更好。在对木质百叶箱、玻璃钢百叶箱、通风干湿表进行对比观测时得出：不同材质百叶箱内所测温度存在差异，特别是在风速较小时，木质百叶箱与玻璃钢百叶箱内部所测温度平均差值大于0.2℃；百叶箱与通风干湿表进行对比得出：①安装在百叶箱中的温度传感器的时间常数比通风干湿表的时间常数大，且百叶箱对空气温度测量具有平滑作用。②白天接近中午后，两种百叶箱比通风干湿表所测温度明显偏高，说明百叶箱受到太阳辐射的影响较明显。

7.1 背景和目的

空气温度是表征空气冷热程度的物理量，是气象观测最重要的气象要素。大气中发生的热力、动力过程和水汽相变过程等都与空气温度有着密切的关系。空气温度每时每刻都在影响人们的生活、工作及一切活动。气温也是决定大气状况的基本要素，气温的变化直接影响一些天气现象的生消。

由于测温仪器或传感器的示值易受环境辐射的影响，包括太阳直接辐射、散射辐射和周围环境辐射等。在气温观测时，其测量仪器或传感器必须有防辐射装置避免和减小环境辐射的影响，气温观测的仪器或传感器通常要放在百叶箱或防辐射罩内。由于百叶箱和防辐射罩的结构、大小、材料和加工工艺等的不同，其防辐射性能不同，使得气温的测量结果不同。

为认识不同防辐射罩和不同百叶箱的防辐射性能，以《地面气象观测规范》规定的气象业务用百叶箱为参考，在中国气象局大气探测试验基地进行了温度比对试验，同时对两种不同材质通风百叶箱内所测温度进行了对比试验。

7.2 试验准备

两种不同材质百叶箱内和三种不同结构的防辐射罩安装在同一观测场内，进行温度观测试验。木质百叶箱与玻璃钢百叶箱及防辐射罩装置中安装同一厂家的PT100型铂电阻温度传感

*本报告执笔人：胡树贞，王志成，莫月琴，王小兰



器，在观测场的自然条件下同时进行观测，每分钟取一组比对数据。试验设备明细见表7.2-1。

表7.2-1 试验设备列表

序号	设备名称	设备型号	数量	单位	备注
1	WMO通风干湿表		1	套	借用国瑞智测试设备有限公司
2	二等铂电阻数字温度计	SWJ-KB	2	台	工程中心提供
3	数字通风干湿表	STG—KA	1	台	工程中心提供
4	业务用温度传感器	PT100	5	套	购买江苏无线电研究所有限公司设备，允许误差 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
5	长波辐射表2台+辐射数据采集器	WUSH-BFS	1	套	借用江苏无线电研究所有限公司
6	热球式风速表	ZRQF-F30J	1	台	工程中心提供，辅助测量通风干湿表通风速度
取1.5m风速的辅助资料（试验场地已有相应设备）					

7.3 试验内容及数据分析

7.3.1 辐射罩与百叶箱防辐射性能比对分析

（1）参考百叶箱和防辐射罩

选用自动气象站配置的玻璃钢百叶箱为参考，该百叶箱内部高615mm、宽470mm、深465mm。被试防辐射罩有三种，第一种高280mm，半径40mm，有11层盘；第二种高170mm，半径40mm，有6层盘；第三种高250mm，半径120mm，有15层盘，三种防辐射罩尺寸汇总于表7.3-1，实物照片如图7.3-1所示。

表7.3-1 三种防辐射罩尺寸

	高（mm）	半径（mm）	层数
第一种	280	40	11
第二种	170	40	6
第三种	250	120	15

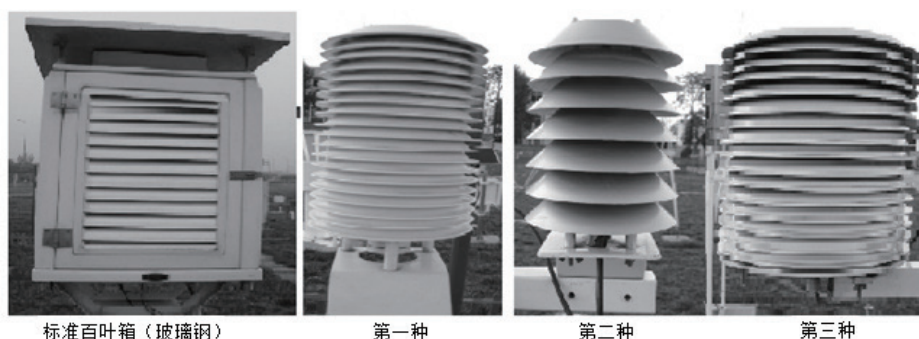


图7.3-1 参试百叶箱和被试防辐射罩

参考标准百叶箱和被试防辐射罩安装在同一观测场内，相距不超过5m，温度传感器的感应部分距地面1.5m，四支处于同一高度上。试验前对温度传感器进行了检定，均符合技术指标要求，其示值误差不超过 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，试验结束后又进行了一次检定，均合格。

（2）数据采集和处理

四个温度传感器采用各自独立的数据采集器，将其测量数据以无线方式传输给数据处理计算机，每分钟采集一组数据。从2014年3月1日0时0分至5月31日23时59分，在进行了数据质量控制并剔除异常值后，共有165239组有效数据。

先将三种防辐射罩内各次温度测量结果与相同时间参考百叶箱内温度比对所得误差，以观测时间的前后顺序制作温度误差随观测顺序变化的图形，以便直观观察三种防辐射罩的防辐射性能，如图7.3-2所示。

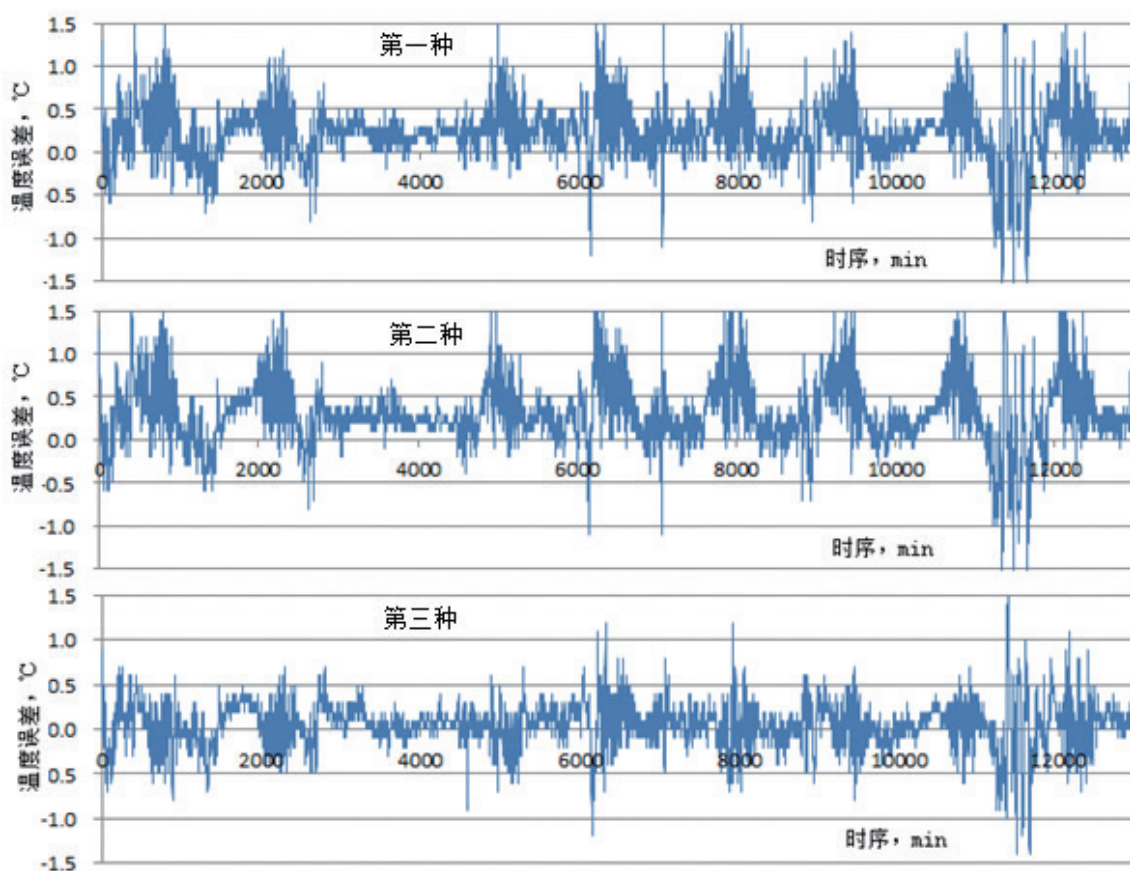


图7.3-2 三个厂家的防辐射罩内的温度误差随时间（逐分钟）的变化

从图7.3-2可以看出，三种防辐射罩内的温度误差变化都在 $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ 之间。其中第三种温度散布中心整体较接近于 0°C ；第一种和第二种防辐射罩内的温度误差总体偏高 $0.2^{\circ}\text{C} \sim 0.3^{\circ}\text{C}$ 。



为了分析三种防辐射罩内温度测量结果与参考标准百叶箱内温度测量结果之间的误差，得到三种防辐射罩的防辐射性能比对结果，对所有数据按不同观测时间分组，从0时至23时共分24组，每个时次包括相应时段从00分到59分的数据。

分别用被试三种防辐射罩，每个时次，每次测量结果减去同时次相同时间参考标准百叶箱中的温度测量结果，分别计算三种防辐射罩内温度传感器每次测量的误差，并统计各时次误差的系统误差和标准偏差（正态分布）。系统误差为一组误差的平均值，用于表示该组误差的散布中心；标准偏差表示一组误差以系统误差为中心的散布范围。结果如表7.3-2所示。

表7.3-2 三种防辐射罩中的温度测量结果与参考标准百叶箱中温度之间的误差统计

观测时间 (时)	比对次数	系统误差 (°C)			标准偏差 (°C)		
		第一种	第二种	第三种	第一种	第二种	第三种
0	5305	0.15	0.03	0.05	0.28	0.28	0.26
1	5255	0.18	0.06	0.08	0.29	0.28	0.24
2	5228	0.15	0.01	0.04	0.34	0.33	0.28
3	5221	0.21	0.08	0.09	0.32	0.33	0.31
4	5206	0.22	0.1	0.09	0.34	0.34	0.32
5	5215	0.28	0.17	0.11	0.34	0.35	0.33
6	5159	0.37	0.33	0.14	0.32	0.37	0.29
7	5160	0.45	0.51	0.18	0.29	0.38	0.21
8	5279	0.43	0.55	0.13	0.25	0.33	0.17
9	5298	0.38	0.58	0.02	0.27	0.37	0.21
10	5123	0.36	0.61	-0.02	0.3	0.39	0.25
11	5155	0.33	0.46	-0.05	0.31	0.36	0.27
12	5254	0.36	0.47	-0.01	0.32	0.39	0.26
13	5305	0.34	0.4	-0.01	0.3	0.4	0.25
14	5289	0.28	0.33	0.00	0.29	0.35	0.26
15	5274	0.21	0.25	-0.03	0.25	0.28	0.21
16	5281	0.16	0.18	-0.02	0.2	0.22	0.17
17	5244	0.10	0.11	-0.01	0.15	0.17	0.13
18	5228	0.09	0.04	0.02	0.21	0.21	0.18
19	5240	0.15	0.05	0.06	0.28	0.30	0.25
20	5242	0.16	0.06	0.05	0.30	0.31	0.28
21	5207	0.14	0.04	0.04	0.34	0.36	0.28
22	5222	0.18	0.07	0.07	0.27	0.34	0.23
23	5243	0.17	0.05	0.05	0.27	0.30	0.26

(3) 防辐射罩防辐射性能分析

表7.3-2的统计结果制作三种防辐射罩中温度误差随观测时次变化的系统误差曲线，如图7.3-3所示。

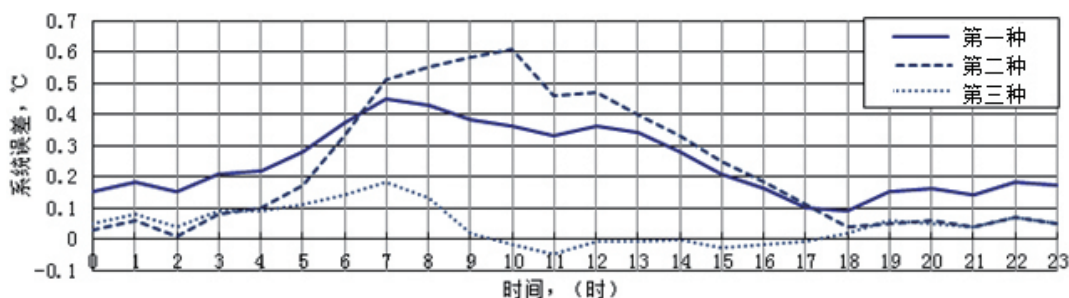


图7.3-3 不同观测时次，各种防辐射罩内温度系统误差的变化

从表7.3-2和图7.3-3可以看出，第一种和第二种防辐射罩呈现明显的辐射误差。第一种从3:00点钟误差已大于0.2℃，最大辐射误差在7:00点钟，系统误差高达0.45℃，直到15:00才低于0.2℃。第二种从5:00点钟以后误差大于0.2℃，最大辐射误差在10:00点钟，系统误差高达0.61℃，直到15:00以后才低于0.2℃。第三种是误差最小的一种，7:00点钟最高，但仅有0.18℃，甚至10:00到17:00系统误差为负值，小于百叶箱的测温。从上述结果分析，对于自然通风防辐射罩，尺寸大、层数多的防辐射罩防止太阳辐射的效果会更好。

根据世界气象组织《气象仪器和观测方法指南》的要求，气象仪器的测量误差可用其系统误差和标准偏差的数值区间表示为()的形式，取误差区间两边绝对值最大的数值作为被试防辐射罩内温度测量误差极限的点估计值，并取置信度为95%，即 $k=2$ 。数据计算可得，三种防辐射罩内温度测量各时次误差极限的点估计值，如图7.3-4所示。

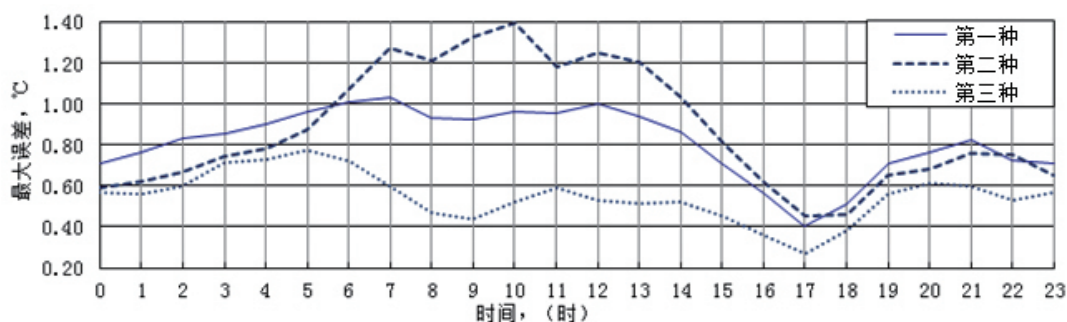


图7.3-4 三种防辐射罩内温度分时最大误差95%置信度的点估计值



目前,地面气象仪器观测网提供给业务应用单位的气温数据,是在百叶箱内的观测结果,图7.3-3表示的是三种防辐射罩内温度系统误差随观测时次的变化,可用于表示防辐射罩内的温度数据与地面气象观测网数据的可比较性;图7.3-4表示的是95%置信概率各时次的误差极限值。

根据世界气象组织《气象仪器和观测方法指南》的要求,温度观测要求的测量误差为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,目前能够达到的测量误差为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 。若百叶箱本身造成的温度误差不计,就温度传感器从百叶箱中移至防辐射罩内造成的系统误差而言,第一种和第二种防辐射罩超过了世界气象组织对于温度观测误差的要求,第三种防辐射罩则基本符合要求。

图7.3-4给出的是防辐射罩内温度系统误差和随机误差的综合结果,不但包括防辐射罩内温度的系统误差,同时还包括随机误差的影响,是在95%的置信概率下,温度误差不会超过的值,还有5%可能超过图7.3-4给出的值。这一误差第一种为 $0.44^{\circ}\text{C} \sim 1.40^{\circ}\text{C}$,第二种为 $0.40^{\circ}\text{C} \sim 1.02^{\circ}\text{C}$,第三种为 $0.28^{\circ}\text{C} \sim 0.78^{\circ}\text{C}$ 。与世界气象组织关于温度观测误差的要求比较,可以说,这三种防辐射罩都不符合气象业务使用要求。

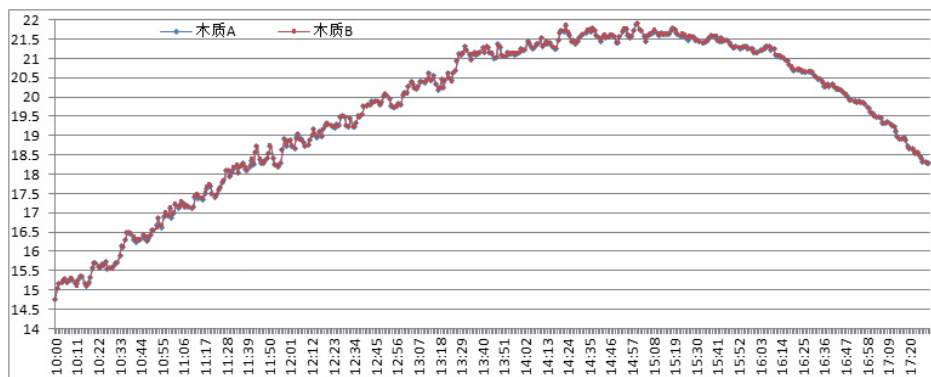
7.3.2 木质百叶箱与玻璃钢百叶箱防辐射性能比对分析

从2014年10月14日开始在南郊进行木质百叶箱、玻璃钢百叶箱与国瑞智通风干湿表对温度影响对比试验。其中在木质百叶箱与玻璃钢百叶箱中各安装1套(2支)SWJ-KB型数字温度计。在1.5m高度安装1套国瑞智通风干湿表,用于测量空气中的温度。

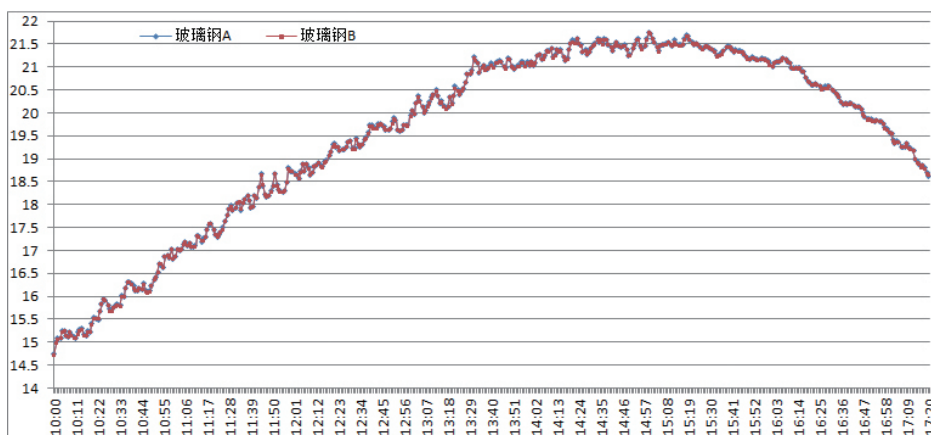
(1) 数据采集与处理

木质百叶箱与玻璃钢百叶箱内安装的2套SWJ-KB型数字温度计于2014年10月在国家计量站进行标定,标定误差小于 0.1°C 。

试验过程中,为保证采集数据的准确性,在每个百叶箱内装有1套(2只)SWJ-KB型数字温度计。为便于分析,木质百叶箱内两只温度计所测数据简称为木质A、木质B,玻璃钢百叶箱内两只温度计所测数据简称为玻璃钢A、玻璃钢B,国瑞智通风干湿表所测的空气温度简称为国瑞智。



2014年10月14日木质百叶箱



2014年10月14日玻璃钢百叶箱

图7.3-5 两种不同材质百叶箱内采集的温度

通过图7.3-5（下文至图7.3-10横坐标单位为时间，纵坐标单位为℃）可看出每个SWJ-KB型温度传感器的两支铂电阻在同一个百叶箱中测量的数据是一致的，另外结合在计量站对两个SWJ-KB型温度传感器的检定结果，也说明SWJ-KB温度传感器的测量结果是可信的，能够准确地测量百叶箱内的空气温度。在下面的数据分析中，每个百叶箱防护罩内只选取1只温度传感器所测的数据进行对比分析。

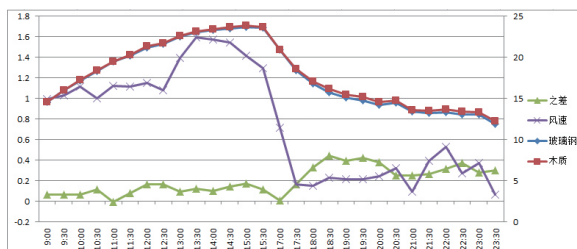
（2）木质百叶箱与玻璃钢百叶箱所测温度对比

由于分钟数据量大，且与风速对应困难，本部分数据分析是对30分钟内的温度分钟数据进行取平均再进行分析，对1.5m高度处的机械风速数据进行同样的30分钟平均处理。

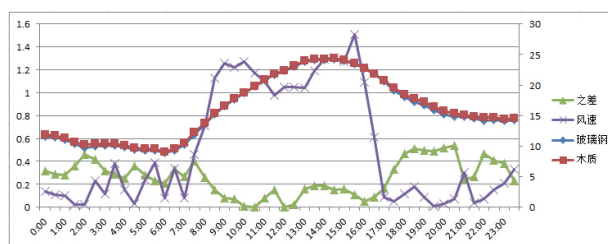
对2014年10月17日—21日和11月01日—11日两个时间段内传感器采集的分钟数据进行30分钟平均处理。其中，图例中的木质代表木质百叶箱内所测温度、玻璃钢代表玻璃钢百叶箱内所测温度，之差代表木质百叶箱内所测温度减去玻璃钢百叶箱内所测温度值，风速为同一观测场



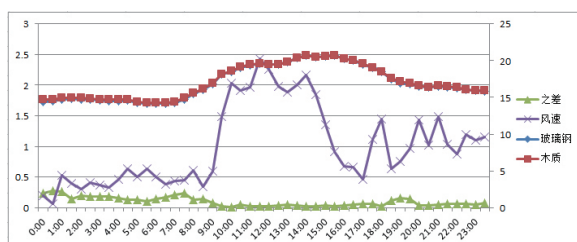
1.5m高度处机械风的风速数据，其中木质、玻璃钢所测温度的坐标轴为右侧坐标轴。对比试验期间数据走势如图7.3-6所示。



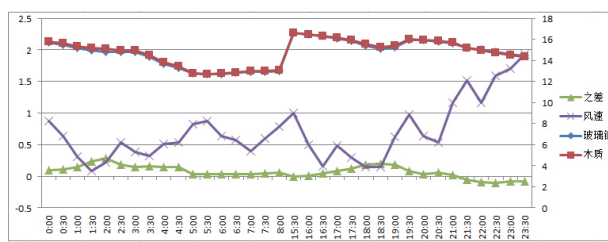
2014年10月17日



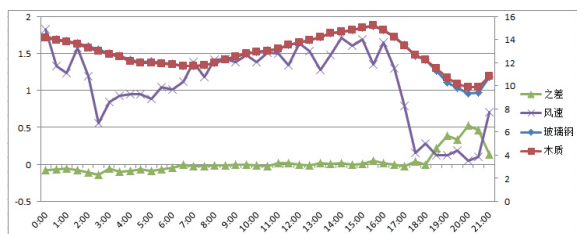
2014年10月18日



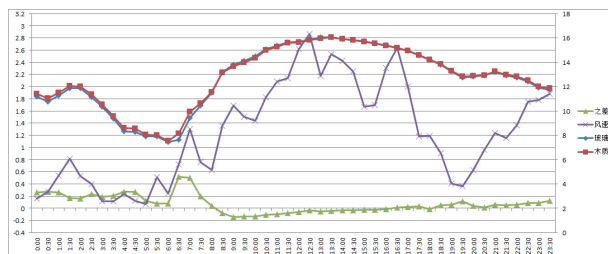
2014年10月19日



2014年10月20日



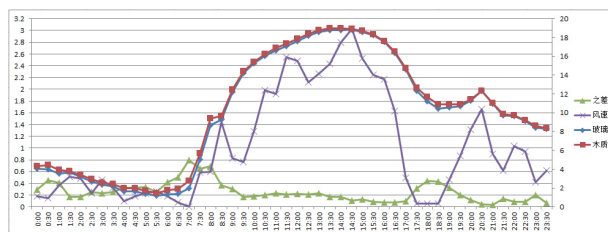
2014年10月21日



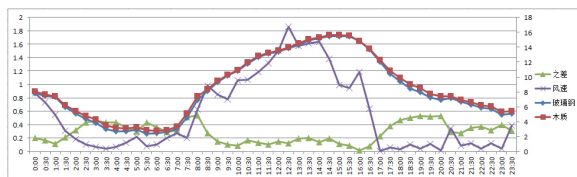
2014年11月01日



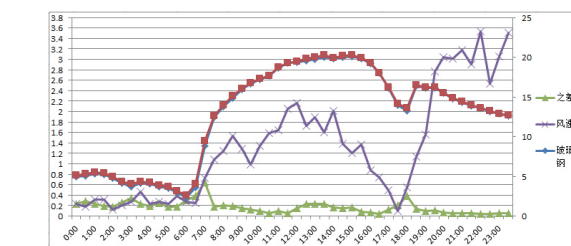
2014年11月02日



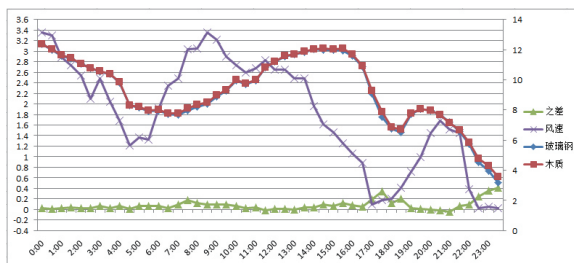
2014年11月03日



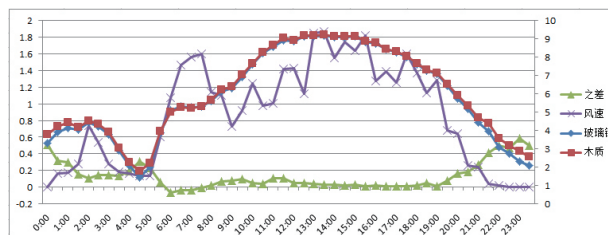
2014年11月04日



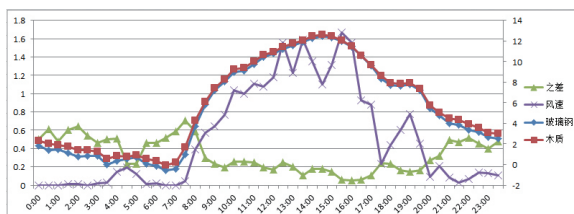
2014年11月05日



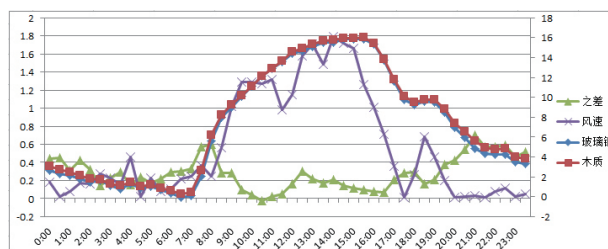
2014年11月06日



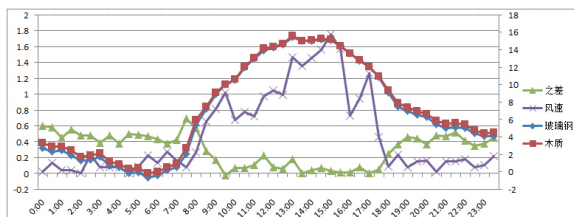
2014年11月07日



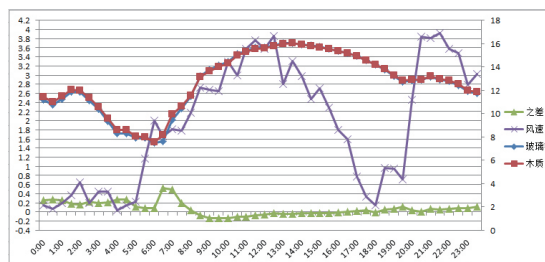
2014年11月08日



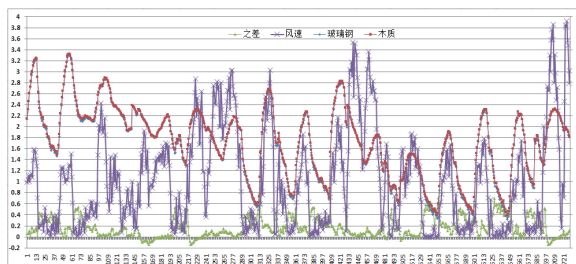
2014年11月09日



2014年11月10日



2014年11月11日



所有样本汇总

图7.3-6 两种材质百叶箱所测温度及温度差和风速走势



对试验数据进行30分钟取平均后共获取729个样本序列，总体729个样本中，木质百叶箱内所测温度比玻璃钢百叶箱内所测温度平均偏高 0.175°C 。其中，木质百叶箱所测温度比玻璃钢百叶箱所测温度偏低样本数71个，占比9.7%，最大偏低 -0.14°C ；木质百叶箱所测温度比玻璃钢百叶箱所测温度偏高样本数644个，占比88.3%，最大偏高 0.79°C ；两种材质百叶箱所测温度相同样本数为14个，占比1.9%；木质百叶箱所测温度比玻璃钢百叶箱所测温度偏高 0.2°C 以上的样本序列有261个，占比35.8%。

另外，从图7.3-6中可以看出，木质百叶箱与玻璃钢百叶箱所测温度之差一般情况下在白天相差较小，夜间相差较大，这种现象可能与白天的太阳辐射或夜间的长波辐射有关，也可能与风速的影响有关。

（3）百叶箱温度与风速关系

从图7.3-6中可以看出，木质百叶箱与玻璃钢百叶箱所测温度数据之差与风速的大小有关，具体为风速大时，二者之差小，风速小时，二者之差增大。为验证这种观点对729个样本按照风速大小进行分类，具体分为大风速样本（风速 $>0.5\text{m/s}$ ）、小风速样本（风速 $\leq 0.5\text{m/s}$ ）。

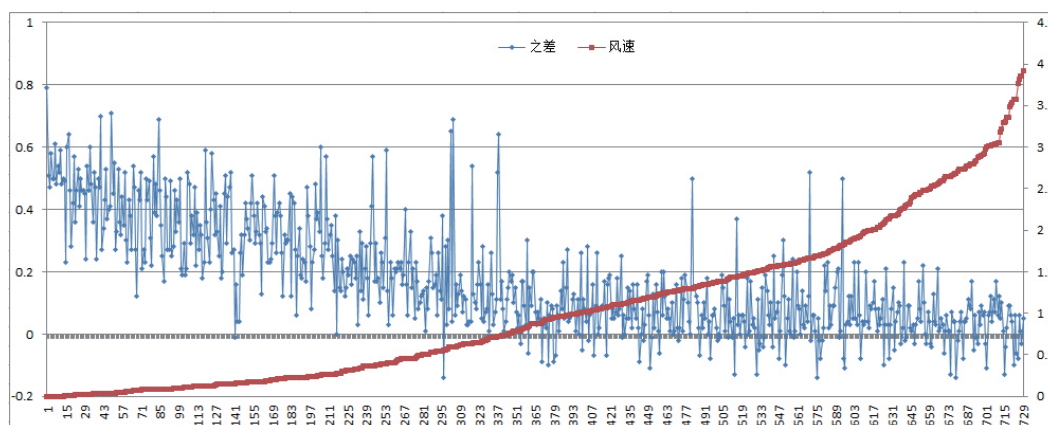


图7.3-7 两种材质百叶箱所测温度差与风速走势图

图7.3-7为木质百叶箱与玻璃钢百叶箱所测温度之差与风速走势图，从图中可以看出，随着风速（右坐标轴）逐渐变大，两种百叶箱内温度之差有减小的趋势。而风速较小时，百叶箱内外气流交换不畅，不同材质百叶箱内的辐射增温不一致，导致两种百叶箱内温度之差变大。因此百叶箱应通风良好时的温度才能更好的代表大气温度。

729个样本中，风速 $\leq 0.5\text{m/s}$ 的样本数共有283个，在小风速样本中木质百叶箱所测温度比玻璃钢百叶箱内所测温度平均偏高 0.328°C ，只有一个样本木质百叶箱内温度比玻璃钢百叶箱内所测温度偏低 -0.01°C ；木质百叶箱所测温度比玻璃钢百叶箱所测温度偏高 0.2°C 以上的样本

数为224个，占比79.1%。

风速 $> 0.5\text{m/s}$ 的样本总数为446个，所有大风速样本中木质百叶箱所测温度比玻璃钢百叶箱内温度平均偏高 0.078°C ，两种材质百叶箱温度之差介于 $-0.2\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ 范围的样本数据为409个，占比91.7%。

（4）百叶箱温度与通风干湿表数据对比

在《气象仪器和观测方法指南》中，世界气象组织推荐使用的温度和湿度标准器为“WMO参考标准干湿表”，这种干湿表由澳大利亚国家标准实验室设计。中国气象局早在在上世纪80年就试制成功，并投入了使用。通风干湿表如图7.3-8所示。



图7.3-8 国瑞智生产的通风干湿表

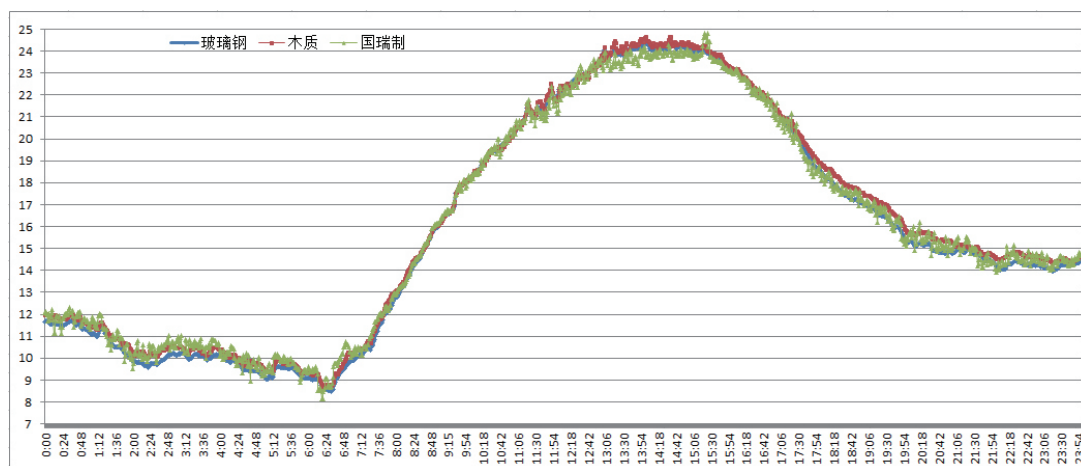


图7.3-9 百叶箱与通风干湿表所测温度走势

图7.3-9为两种材质百叶箱与通风干湿表所测温度走势。（1）从图中可以看出通风干湿表所测数据抖动比两种材质百叶箱所测数据明显偏大，说明安装在百叶箱中的温度传感器的时间常数较大，另外百叶箱对空气温度测量具有明显的平滑作用。（2）11点钟以后，两种百叶箱



比通风干湿表所测温度明显偏高，说明百叶箱测量温度明显受到太阳辐射的影响。

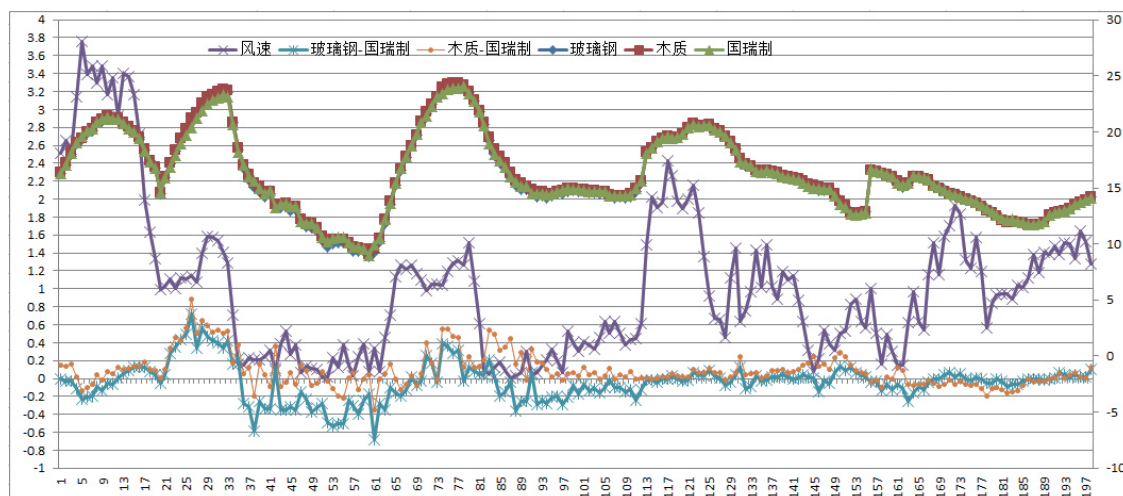


图7.3-10 百叶箱与通风干湿表所测温度及其温度之差走势

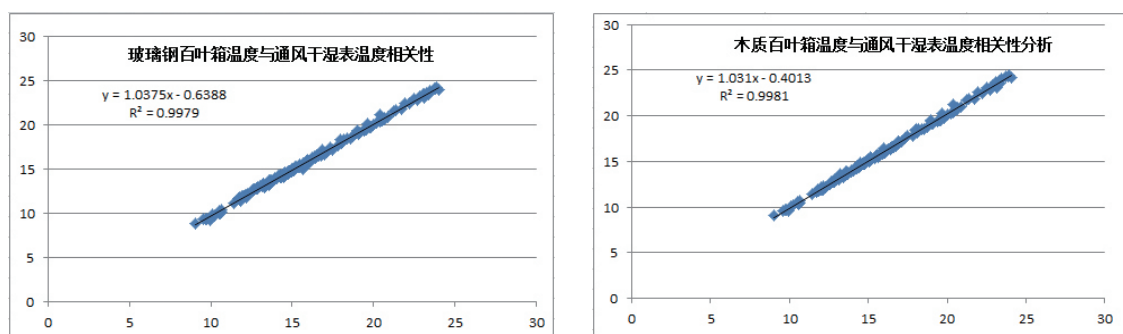


图7.3-11 百叶箱与通风干湿表所测温度相关性分析

图7.3-10中为对比试验期间各温度传感器所测分钟数据进行30分钟取平均后的温度分布，及木质百叶箱内传感器数值与通风干湿表的差值和玻璃钢百叶箱内传感器与通风干湿表温度差值的分布，共179个样本。通过对全部样本分析，玻璃钢百叶箱所测温度数值相比通风干湿表所测温度平均偏低0.043℃，木质百叶箱所测温度比通风干湿表所测数值平均偏高0.091℃，二者都在目前气象业务要求的精度范围之内。

图7.3-11为百叶箱所测温度与通风干湿表相关性分析，通过分析可见百叶箱内温度与通风干湿表所测数据具有非常高的相关性。

若考虑风速因素的影响，在179个样本中，风速 $\leq 0.5\text{m/s}$ 的样本数67个，其中玻璃钢百叶箱所测温度比通风干湿表平均偏低0.2℃，木质百叶箱内温度比通风干湿表数值平均偏高0.08℃。风速 $> 0.5\text{m/s}$ 的样本总数为112个，玻璃钢百叶箱所测温度比通风干湿表所测温度平均偏高0.05℃，木质百叶箱所测温度比通风干湿表数值平均偏高0.1℃。

由于对比试验时间较短，数据样本少，所得结论还需进一步进行验证。

从图7.3-6中可以看出，对于木质百叶箱与玻璃钢百叶箱所测温度在白天接近，而夜间差距较大，影响的原因可能是：试验期间，白天的风速较大，使两者测量的数字较接近；试验是在10月份进行，期间太阳辐射强度适中，辐射误差不明显；夜间由于两种材质的百叶箱对外热辐射不同，造成两种测温度结果差距变大。更确切的结果还需进一步对比试验分析。

7.4 试验结论与讨论

从三种通风防辐射罩与玻璃钢百叶箱测温对比试验数据可以看出，不同结构防辐射罩的防辐射性能有较大的差异。对于自然通风的防辐射罩，尺寸大、层数多、内部空间大的防辐射罩屏蔽太阳辐射的效果会更好。因此，可通过更多的试验给出防辐射罩的结构与辐射误差的关系，建议通过进一步试验，以得出正确、全面的结论，确定防辐射罩的最佳结构设计。

不同材质百叶箱内所测温度存在差异，特别是在风速较小时，木质百叶箱与玻璃钢百叶箱内部所测温度平均差值大于 0.2°C ，原因是木质百叶箱通风条件相比玻璃钢百叶箱较差，在风速较小时，百叶箱内部热辐射能量不能及时与外界空气交换，造成测量空气温度偏高。另外，对于木质百叶箱与玻璃钢百叶箱所测温度在白天接近，而夜间差距较大，影响的原因可能是：试验期间，白天的风速较大，使两者测量的数字较接近；试验是在10月份进行，期间太阳辐射强度适中，辐射误差不明显；夜间由于两种材质的百叶箱对外热辐射不同，造成两种温度测量结果差距变大。更确切的结果还需进一步对比试验分析。

百叶箱与通风干湿表进行对比：（1）安装在百叶箱中的温度传感器的时间常数比通风干湿表的时间常数大，且百叶箱对空气温度测量具有平滑作用，因此，通风干湿表所测数据比两种百叶箱所测数据有明显的波动性。（2）11点钟以后，两种百叶箱比通风干湿表所测温度明显偏高，说明百叶箱受到太阳辐射的影响，使百叶箱内温度升高。不同材质百叶箱与通风干湿表进行对比，由于对比试验时间在秋冬季，太阳辐射强度较弱且对比试验时间太短，太阳辐射对两者的影响不明显，还需进一步试验得出定量的结果，给出客观的分析结论。

