

# LPA10激光雨滴谱仪的定标及观测对比

张建云<sup>1</sup> 张珏<sup>2</sup>

(1 中国华云气象科技集团公司,北京 100081; 2 北京敏视达雷达有限公司,北京 100094)

**摘要:** 目前在激光雨滴谱仪的气象应用中存在两个主要问题: 强降水降水量测量偏差较大和无站点标定装置。LPA10激光雨滴谱仪以特有技术加强降水粒子尺度测量精度的方式, 实现了在强降水过程中较小的测量偏差。此外, 该激光雨滴谱仪配有可供台站使用的标定装置, 便于提高观测数据的质量。通过实验室对比测试和技术参数分析, 以及在实际降水中的对比观测和误差分析, 结果表明, 在弱降水观测中, LPA10与国际流行的雨滴谱仪降水量测量偏差都在5%左右; 在强降水的观测中, LPA10与雨量计降水量测量对比偏差较小, 绝大部分绝对偏差在5%以内, 取得了较好的观测和应用效果。

**关键词:** 雨滴谱仪, 自适应, 雨量计, 累积降水量, 精确度

**DOI:** 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.06.006

## Calibration and Comparative Observation of LPA10 Laser-Optical Disdrometer

Zhang Jianyun<sup>1</sup>, Zhang Yao<sup>2</sup>

(1 China Huayun Meteorological Technology Group Corporation, Beijing 100081

2 Beijing Metstar Radar Co., Ltd., Beijing 100094)

**Abstract:** There are two main problems in the application of laser-optical disdrometer at present, i.e., a large precipitation accumulation deviation for heavy rains and no calibration device applied to the equipment for meteorological observatory. The new LPA10 laser-optical disdrometer, which uses unique technologies, gets a better precision of precipitation particle size measurement and achieves a small deviation during heavy rain situations. Furthermore, the LPA10 disdrometer is equipped with a calibration device for the meteorological observatory to ensure the measurement accuracy and data validity of the device. Through comparative observation and analysis of a variety of equipment in laboratory and outdoor, the results show that in the observation of normal rain, both the LPA10 and the international popular laser-optical disdrometer got a small deviation of accumulated rainfall, which is about 5%. However, in the observation of heavy rain, the deviation of accumulated rainfall between the LPA10 laser-optical disdrometer and the traditional rain gauge is quite small, and most of the absolute deviations are within 5%, which gets a better application effect.

**Keywords:** disdrometer, self-adaptive, rain gauge, accumulated rainfall, accuracy

### 0 引言

雨滴谱观测是云降水物理学研究的重要内容之一, 它反映了云中成雨过程、云动力学和微物理学之间的相互制约。激光雨滴谱仪是一类以激光为探测媒介, 基于降水粒子通过激光测量区域时的消光原理<sup>[1]</sup>, 采用光电信号转化的处理方法和算法, 获取降水粒子外形和通过激光区域的时间信息, 进而反演出丰富的降水产品。通过雨滴谱观测可以得到多种降水

物理参量(如粒子数密度、粒径分布、雨量、雨强)和雨滴对微波的衰减(雷达反射率因子)等。在此基础上, 可以建立雷达反射率因子和降水强度之间的经验关系系数, 用于改善天气雷达的定量降水估测能力。此外, 雨滴谱观测对进一步了解自然降水的物理过程、研究成雨机制、评估人工增雨的云水条件、检验催化效果以及数值模拟等方面提供科学依据具有重要意义<sup>[2-4]</sup>。

### 1 激光雨滴谱仪的研究进展及应用

#### 1.1 激光雨滴谱仪的研究进展

目前, 国际激光雨滴谱仪领域, 主要是按激光光束测量维度的原理划分两种类型: 1维(1D)激光雨滴谱仪和2维(2D)激光雨滴谱仪。以德国

收稿日期: 2018年6月1日; 修回日期: 2018年10月23日  
第一作者: 张建云(1962—), Email:jianyun.zhang@metstar.net  
资助信息: 气象关键技术集成与应用(重点)项目(CMAGJ2013Z21); 华云集团科技项目(HYKJXM-201602)

OTT的Parsivel系列激光雨滴谱仪和奥地利的2D视频(2D Video)雨滴谱仪作为流行设备最具代表性。在测量原理方面,1D激光雨滴谱仪发射出一束平行激光测量降水粒子的截面直径为基本原理;2D激光雨滴谱仪则可发出两束正交的平行激光光束同时得到降水粒子在其正交方向上的截面轮廓为基本原理。该两类设备分别基于上述粒子截面数据作为降水的原始参数,1D雨滴谱仪可衍生降水粒子的雨滴谱(直径、速度、个数)、降水强度、降水量、降水类型和雷达校准因子等降水信息;2D视频雨滴谱仪除上述1D雨滴谱仪的所有降水信息外,还可绘出每个降水粒子的投影轮廓,产品更加丰富。但是,2D视频雨滴谱仪在探测粒子的最大测量速度(10 m/s)<sup>[5]</sup>方面较1D雨滴谱仪(20 m/s)更低,这使其在测量速度过快的大雨滴和大冰雹方面表现较为逊色。此外,由于价格昂贵、标校复杂和校准频次相对较多等因素,导致2D视频雨滴谱仪仅应用于一些降水相关领域的科学研究中,并没有成为气象业务设备。美国国家航空航天局(NASA)针对上述二者进行了对比观测试验<sup>[6]</sup>,主要关注雨滴直径、直径测量方差和降水量三个参数。实验结果表明:在降水强度20 mm/h以内,二者差异不大;当降水强度超过30 mm/h,Parsivel对降水量高估过多;但在总体上,基于上述三个要素的评估,两种设备相差不大。因此,1D测量原理的Parsivel激光雨滴谱仪,以价格低廉、使用维护简单、测量效果好等诸多特点占据了绝大部分气象领域的市场份额。

在测量精度方面,目前激光雨滴谱仪对强降水观测时降水测量偏差较大。主要原因是自然环境中的干扰因素较多,例如自然光线明暗、雾霾造成的能见度降低、空气中粉尘增加以及激光透射窗口沾水等。在众多干扰因素之中,以降水过程中激光透射窗口沾水影响最为严重。通常自然界中的降雨过程是风雨交加的,作为降雨探测设备,激光透射的玻璃窗口沾水会造成单个粒子测量值偏大,进而导致降水量偏差增大的后果。Tokay等<sup>[7]</sup>的研究表明当前流行的Parsivel激光雨滴谱仪对直径小于0.76 mm的降雨低估,对直径大于2.4 mm的降雨高估,尤其强降雨时高估更加严重;另外,新型Parsivel<sup>2</sup>在累积降水量50 mm以下的绝对偏差为6%。Graham等<sup>[8]</sup>表示Parsivel在探测小粒子方面表现逊色,其试验中Parsivel和翻斗式雨量计相比的绝对偏差是18%。

在速度测量方面,2D视频雨滴谱仪的速度测量上限是10 m/s,难以检测速度过快的粒子。自然界中4 mm的大雨滴终端速度在9 m/s左右<sup>[9]</sup>,雨滴的尺度越大接近地面时外形呈椭球或馒头状,此时雨滴的长短

轴之比大于20%<sup>[10-11]</sup>。1D雨滴谱仪,由于其测量原理的局限性,使用长轴反演速度造成测量值偏高——只能探测到降水粒子水平方向上的最大截面,由于不能区分粒子相态,使其不能识别固态液态,不能有效地修正长短轴带来的问题。因此,1D雨滴谱仪对雨滴速度高估后与冰雹速度相近<sup>[12]</sup>,容易造成这两类降水现象的误判。

## 1.2 激光雨滴谱仪标定分析

目前激光雨滴谱仪设备无随机装配的标定装置,使得设备安装后,在其长期运行的过程中,其测量精度是否变差处于未知状态。而脱离数据的可靠性讨论应用就是无稽之谈,激光雨滴谱仪的应用局限性在于此。在现有技术条件下,有两种可适用于激光雨滴谱仪的标定方法,分别是转盘标定法和钢珠标定法。

转盘标定法的装置采用在旋转电机的轴向安装透明亚克力板,其板上粘贴不透光的圆形遮挡片模拟被测粒子。电机转动从静止开始加速到指定角速度,待转速稳定后,用激光雨滴谱仪测试遮挡片的直径和线速度。转盘标定装置采用参数为国际标准ISO 7823中规定标称透光率大于92%、板厚公差±10%的亚克力板。其介质均匀度较空气差,虽然在静止状态下,激光透射强度较为稳定。但电机旋转后,一方面,由于板的不均匀产生了动态的透光差异;另一方面,板在垂直电机轴向产生微小幅度的抖动,其效果与板的不均匀产生的透光差异类似,且该轴向抖动幅度与电机转速成正比,即电机转速越快激光透射强度越不稳定。以上两点都导致在转盘标定装置工作时,被测的激光雨滴谱仪透射亚克力板后的激光强度在小幅度地不断变化。目前流行的激光雨滴谱仪大都以激光能量强度作为探测原理,其接收激光遮挡能量强度最大值与被测粒子直径成正比例关系,速度与遮挡粒子的时间成反比。在该情形下,即使转盘标定装置上无粘贴遮挡片,以激光能量强度为测量原理的雨滴谱仪,仍然会产生0.3~0.5 mm的虚假粒子。因此,该转盘标定装置只有在遮挡片直径远大于0.3~0.5 mm时,虚假粒子对直径测量造成的影响才可以忽略。若定义远大于为超过当前尺度一个量级,则遮挡片为直径3~5 mm以上的尺度。在速度测量方面,该方法仍然存在一定的影响因素。虚假粒子叠加在大尺度遮挡片上后,会延长该遮挡片在测量中的通过时间,进而导致测量速度值偏小。此外,虚假粒子是由板的不均匀造成的变值,因此测出的粒子速度也是一系列变值。

转盘标定法有两个优点:1)可通过粘贴不同尺度的遮挡片来改变测量粒子尺度;2)其速度可以涵盖整个测试区间范围。转盘标定装置除了原理方面有

上述局限性之外，在外形、使用等方面也存在制约因素，都导致其不适用于观测站使用。

钢珠标定法是指在被测设备正上方，人为地投放标准尺度钢珠。该方法直径标定准确，速度标定存在局限性。在速度标定方面，只能以固定高度做自由落体运动的方式进行标定，不适合较高速度的标定测试。

上述两种标定方法，主要应用在实验室测试或设备出厂测试检验中，难以满足在业务中已安装的雨滴谱仪在线标定的应用需求。因此，研制一种台站所需能掌控雨滴谱仪测量精度的标定设备是很有现实意义的。

## 2 LPA10激光雨滴谱仪

### 2.1 LPA10 激光雨滴谱仪的技术特点

#### 2.1.1 标定技术

需求牵引和技术进步推动激光雨滴谱仪相关的技术不断向前。LPA10激光雨滴谱仪<sup>[13-14]</sup>设计的适用于台站的标定装置如图1所示。该标定配置清单包含：标定装置、6 mm以下标准尺度钢珠一套和标定软件——自然界的液态降水粒子绝大部分尺度小于6 mm。该专利技术的标定设备，分解组装简易；可在每年雨季来临之前，对设备清洁维护后，按图1的方式装配在LPA10设备之上，使用出厂配送的标准尺度钢珠，进行尺度和速度标定，来检验设备数据的可靠性。

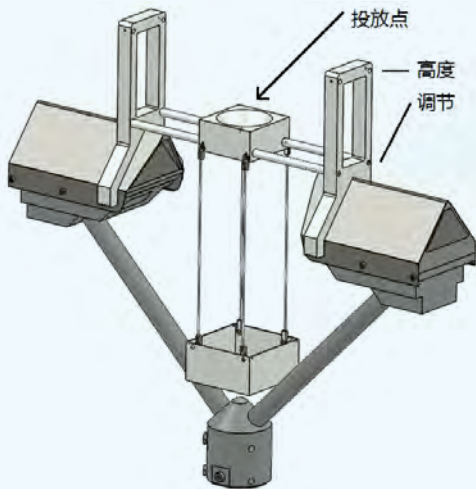


图1 LPA10配备适用于台站的标定装置

Fig. 1 LPA10 equipped calibration device for weather stations

标定装置组装好之后，固定好高度，在投放点处按顺序投放标准尺度钢珠，通过标定软件读取测得的尺度和速度数据。直径和速度测量误差在±20%以内<sup>[15]</sup>，表征设备可信，超出范围厂家维修。由粒子速度 $v=(D+l)/t$ （式中， $D$ 为粒子直径， $l$ 为激光有效宽

度， $t$ 为粒子经过时间）的公式可知，直径测量准确是速度准确测量的必要条件。所以在一定程度上，直径的测量精度成为雨滴谱仪最为核心的标定参数。受限于钢珠标定法的技术瓶颈，本标定方案速度测量值，只是粗略验证测速是否可信，通过有限高度调节验证即可。

#### 2.1.2 技术特点

文献[15]指出在以消光为原理的平行激光光学测量系统中，球体液滴可等效为焦距为其半径的小透镜，折射效应可忽略；前向散射光很少，也可忽略；并且小透镜效应形成的透射光聚焦在球体边缘上的一个点上并以接近90°的角度发散，大部分发散到探测角度以外，在测量中也可忽略。LPA10激光雨滴谱仪是一个以平行光消光为原理的非成像光学测量系统，不仅避开了成像系统物距和透镜焦点之间的相关问题，而且水滴的透镜效应产生的折射、透射光产生的影响对量程内的尺度测量影响甚微。LPA10激光雨滴谱仪的光学原理与Parsivel类似，采用发射端产生脉冲激光、接收端以接收激光线上全部激光能量累积和作为探测基础。由于粒子探测原理是基于单个降水粒子遮挡接收激光能量强度最大值与被测粒子直径成正比关系，因此是不能确定降水粒子所处测量区域中具体位置的。由测量原理局限性导致该类激光雨滴谱仪不能区分多个粒子是否重叠以及粒子是否处于采样区边缘。但是，降水粒子重叠或边缘截断会对直径测量值产生较大的测量偏差，进而导致粒子速度测量值与相应尺寸粒子的理论速度产生较大的偏差，从而可通过质量控制进行滤除。另外，该雨滴谱仪的粒径测量原理不是基于传统线阵CCD成像原理，不是通过成像判定粒子尺寸，不能识别雨滴形变，只能测量雨滴形变的长轴<sup>[16]</sup>，并通过雨滴长短轴的经验关系对其他形变参数进行修正。

LPA10的激光接收窗口带有激光增透膜，对工作的660 nm波长激光增透，对中心波长两侧波长的光产生衰减，从而实现降低外界光线造成的影响。而外界自然光线以及激光器自身综合形成的背景噪声，则淹没在脉冲激光的众多激光能量脉冲尖峰抖动中。由于相邻激光能量脉冲电压幅度差小于8 mV，而设备测量最大量程为3 V。假如以8 mV作为最大背景噪声值进行计算，其能量脉冲抖动折算出的虚拟降水粒子最大直径为0.08 mm。因此背景噪声影响都淹没在测量范围之外的0.1 mm粒子以下，通过参数设定不予测量。另外，LPA10采用动态能量基准<sup>[17]</sup>、激光测量光栅<sup>[18]</sup>等专利技术，解决了一般激光雨滴谱仪由于激光透射窗口沾水、附着灰尘和空气中有雾霾颗粒等造成测量

精度降低的问题。使其在强降雨的情况下，仍可保持较好的测量精确度。

## 2.2 技术参数对比

表1给出了LPA10激光雨滴谱仪与国际流行的Parsivel系列（Parsivel与Parsivel<sup>2</sup>在测量基本参数、尺度范围和数据分级方面保持一致）激光雨滴谱仪主要性能参数的数据。从表1中数据可知：在采样区域上，LPA10比当前流行的1D激光雨滴谱仪更大；在粒子尺度测量范围上，LPA10较之更广；在粒子尺度分级上，LPA10较之更多。其中，采样区域参数表征着激光雨滴谱仪在降水空间的一个抽样。理论上，采样区域越大测量越能反映真实情况。参数的提升需要用实践来检验——实验室检验和降水实际观测检验。

表1 LPA10激光雨滴谱仪与国际流行激光雨滴谱仪参数对比  
Table 1 Comparison of main parameters between LPA10 laser disdrometer and an international popular laser disdrometer

主要参数	LPA10	Parsivel
采样区域尺度 (W×D) /mm <sup>2</sup>	210×30	180×30
采样区域面积/cm <sup>2</sup>	63	54
粒子尺度测量范围/mm	0.1~30	0.2~25
粒子速度测量范围/ (m/s)	0.2~20	0.2~20
粒子尺度分级	64	32
粒子速度分级	32	32

表2和表3分别给出了LPA10和Parsivel在其测量范围内粒子尺度分级的详细说明。从表1和表2中可知，LPA10的标称测量尺度范围是0.1~30 mm，在0.0~30 mm的区间上用64个不同的尺度等级表示；将粒子的尺度分成4组，4个组的分辨率分别是0.125，0.25，0.5，1.0 mm。从表1和表3中可知，Parsivel的

表2 LPA10尺度测量等级分级  
Table 2 Size classifications of LPA10

序号	粒子尺度范围/mm	分辨率/mm	等级范围/mm
1	0.0~2.0	0.125	1~16
2	2.0~6.0	0.25	17~32
3	6.0~14.0	0.50	33~48
4	14.0~30	1.0	49~64

表3 Parsivel尺度测量等级分级  
Table 3 Size classifications of Parsivel

序号	粒子尺度范围/mm	分辨率/mm	等级范围/mm
1	0.0~1.25	0.125	1~10
2	1.25~2.5	0.25	11~15
3	2.5~5.0	0.50	16~20
4	5.0~10.0	1.0	21~25
5	10.0~20.0	2.0	26~30
6	20.0~26.0	3.0	31~32

标称粒子测量尺度范围是0.2~26 mm，在0.0~26 mm的区间上用32个不同的尺度等级表示；将粒子的尺度分成6组，6个组的分辨率分别是0.125，0.25，0.5，1.0，2.0，3.0 mm。

经过对比可以得出，LPA10有以下三个方面的优势：

1) 分辨率高。LPA10在2.0 mm以下的分辨率是0.125 mm；Parsivel在1.25 mm以下的分辨率是0.125 mm；LPA10在2~6.0 mm的分辨率是0.25 mm；Parsivel在2.5~5.0 mm以下的分辨率是0.5 mm；LPA10的最大分辨率是1.0 mm，Parsivel的最大分辨率是3.0 mm。

2) 测量范围大，对小粒子和大粒子的测量能力强。LPA10的标称测量范围为0.1~30 mm的粒子尺度；而Parsivel的标称测量范围为0.2~26 mm。

3) 粒子尺度分级多。LPA10的粒子尺度分为64级，而Parsivel仅32级。分级多表征数据分辨率高，测量数据不确定性小，测量准确率更高。

## 2.3 实验室静态评估

实验室静态评估方法采用0.1~30 mm标准尺度钢珠作为尺度检测标杆。分别对LPA10和Parsivel设备做固定高度自由落体投放测试。钢珠具体尺度详见表4，尺度精度为0.01 mm。

表4 标定使用的标准尺度钢珠  
Table 4 Standard size calibration steel balls

序号	尺度/mm	说明
1	0.1	
2	0.3	
3~8	0.4~0.9	步进0.1
9	1.0	
10~16	1.5~4.5	步进0.5
17	5.0	
18~40	6.0~28.0	步进1.0
41	28.6	

图2是在相同条件下，选取表4所列的41种不同尺度的钢珠作为尺度测试对象，分别对LPA10和Parsivel每个尺寸粒子进行10次测试，得出的关于粒子尺度等级的测试数据。图2中的横坐标表示粒子尺度的期望值，纵坐标表示两种雨滴谱仪对粒子尺度的测量值。图中的矩形框的右边线表示粒子的实际尺寸，矩形框的纵向尺寸表示测量数据的不确定性，即矩形框的纵向尺寸越大，表示粒子尺度的不确定性越大。矩形框的横向尺寸表示10次测量数据的一致性，即矩形框的横向尺寸越大，测量的一致性越好，每次测量结果在横向上的长度为横向总长度的十分之一。图中蓝色

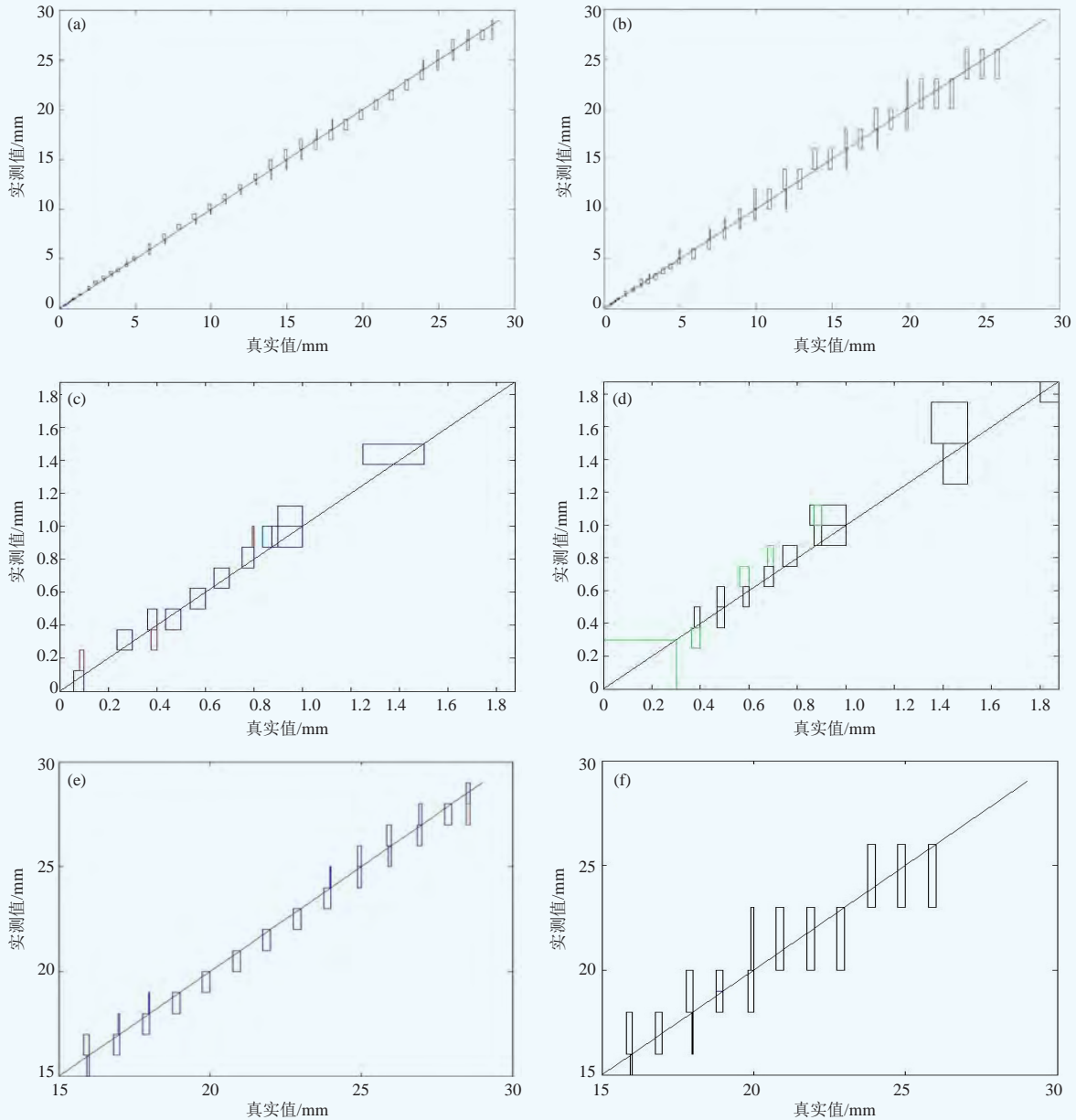


图2 LPA10和Parsivel标准钢珠测试

(a) LPA10在0.1 ~ 28.6 mm范围测试; (b) Parsivel在0.1 ~ 28.6 mm范围测试;  
(c) LPA10在小尺度的放大图; (d) Parsivel在小尺度的放大图;  
(e) LPA10在大尺度的放大图; (f) Parsivel在大尺度的放大图

Fig. 2 Comparing tests with standard steel balls between LPA10 and Parsivel

(a) test in the range of 0.1 to 28.6 mm of LPA10, (b) tested in the range of 0.1 to 28.6 mm of Parsivel,  
(c) test picture zoomed in small scale of LPA10, (d) test picture zoomed in small scale of Parsivel,  
(e) test picture zoomed in large scale of LPA10, (f) test picture zoomed in large scale of Parsivel

和红色矩形表示LPA10产品的测试数据，蓝色和红色矩形的尺度定义参见表2；图中黑色和绿色矩形表示Parsivel产品的测试数据，黑色和绿色矩形的尺度定义参见表3。蓝色和黑色矩形表示测试数据偏离期望值较小，红色和绿色矩形表示测试数据偏离期望值较大。

雨滴谱仪的尺度等级产品是按表2和表3对粒子尺度进行等级分级。下面是对钢珠测量过程中由于尺度

分级带来的分级误差分析。从图2a、图2b可以得出，LAP10可测量的大粒子尺寸可达28.6 mm，而Parsivel激光雨滴谱仪最大测量粒子尺寸为26 mm。从图2c、图2d可以得出，LAP10可测量0.1 mm以上尺寸的粒子，而Parsivel仅能对大于0.4 mm的粒子进行测量。分析图2，可以得出LAP10在粒子尺寸0.1~2.0 mm时，测量误差为0.25 mm；在粒子尺寸2.0~6.0 mm时，测

量误差为0.5 mm；在粒子尺寸6.0~14.0 mm时，测量误差为1.0 mm；在粒子尺寸为14~28.6 mm时，测量误差为2.0 mm。而Parsivel在粒子尺寸0.4~1.0 mm情况下，测量误差为0.25 mm；在粒子尺寸为1.0~5.0 mm时，测量误差为0.75 mm；在粒子尺寸为5.0~10.0 mm时，测量误差为2.0 mm；在粒子尺寸为10.0~19.0 mm时，测量误差为4.0 mm；在粒子尺寸为20~26.8 mm时，测量误差为5.0 mm。当粒子尺度小于1 mm时，LPA10和Parsivel具有同样的测量误差，都为0.25 mm；当粒子尺度大于1 mm时，LPA10的测量误差明显小于Parsivel。在大粒子情况下，LPA10的最大测量误差为2 mm，Parsivel的最大测量误差为5 mm。

## 2.4 强降雨时的对比观测

图3记录了2016—2017年在北京永丰的3次降水

量较大的降水过程。降水过程全程采用LPA10雨滴谱仪、Parsivel雨滴谱仪和SL3-1翻斗式雨量计三种设备进行对比观测。雨量计作为目前地面观测降水量的主流业务设备，国标中规定翻斗式雨量计测量精度最大允许误差为±4%<sup>[19]</sup>。以雨量计作为雨滴谱仪的测量降水量的对比并进行误差统计。

从图3中的累积降水量上可以看到，LPA10在降水全过程累积降水量与雨量计测量值相接近，偏差较小；Parsivel在降水前期与雨量计比较接近，在降雨过程中后期测量值偏大，降水结束时与雨量计偏差较大。从图3中的小时降水强度上可以看到，在整个降水过程中，LPA10的小时降水强度与雨量计的小时降水强度相差比较小；当降水强度达10 mm/h以上时，Parsivel测量值较雨量计偏大，尤其是在2016年7月20

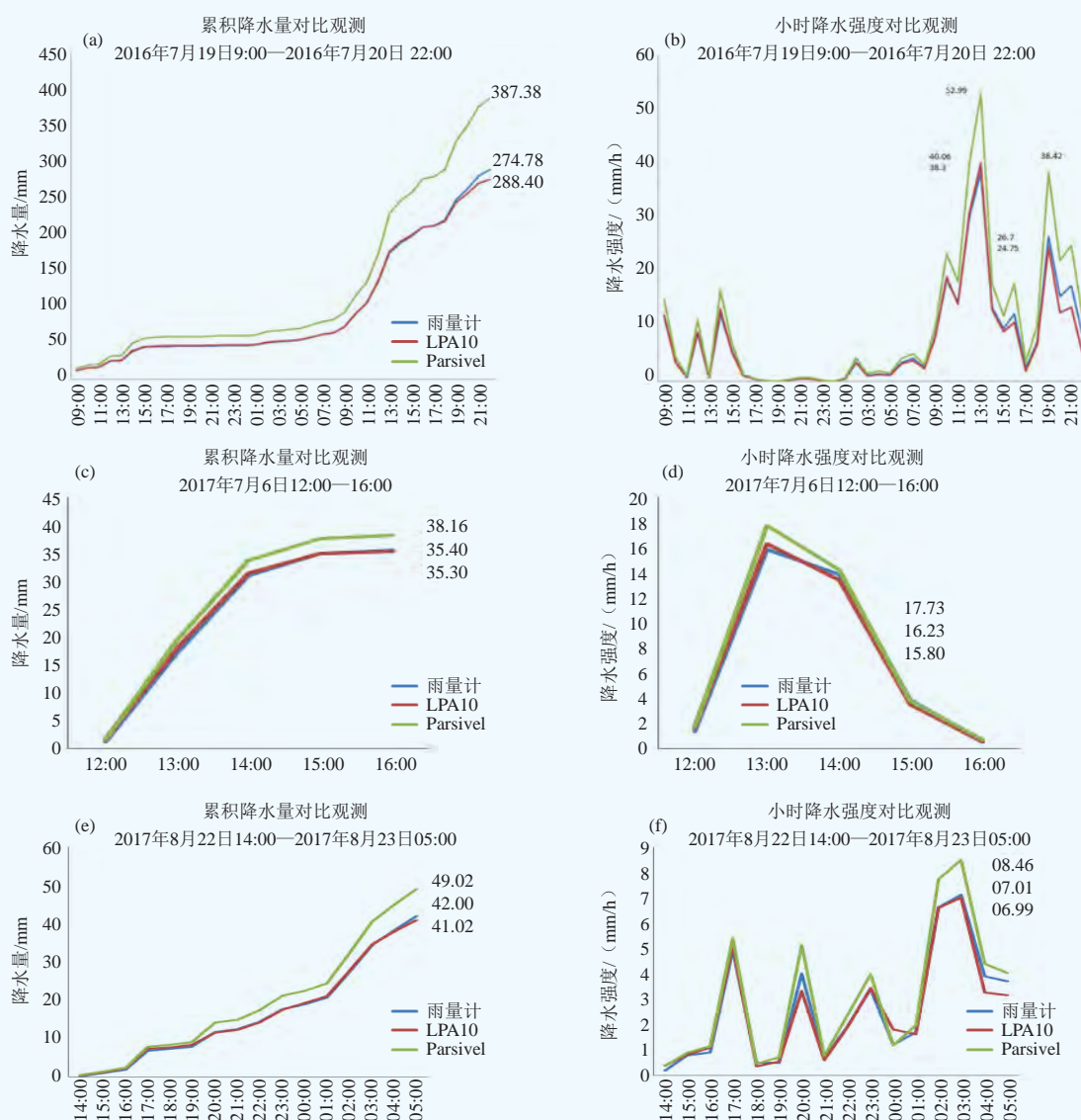


图3 LPA10、Parsivel和SL3-1雨量计对比观测

Fig. 3 Comparing observation among LPA10, Parsivel and SL3-1 rain gauge

日的13时, 40 mm/h以上的降水强度时, 测量值严重偏大, 偏差为38.36%。表5是对上述三场降雨的累积误差分析, Parsivel由于大尺度粒子测量偏差较大导致累积后的降水量偏差越大, Parsivel的测量绝对偏差在7.80%~34.32%; LPA10与雨量计的绝对偏差在0.28%~4.72%。

表6是厦门地区和广州地区在2016—2017年雨季记录完整的几次降雨过程。对比设备为LPA10激光雨滴谱仪和所在观测站的翻斗式雨量计。从该表中误差统计分析, 在强降雨中, LPA10与雨量计测量值较为接近, 整体上绝对值误差在10%以内, 绝大部分在绝对值5%以内。

## 2.5 弱降雨时的对比观测

表7记录了2016—2017年在北京永丰使用LPA10、Parsivel和SL3-1翻斗式雨量计, 三种设备对比观测累

积降水量在20 mm以内的多次弱降水数据。由于翻斗式雨量计的最小测量分辨率为0.1 mm, 湿润损失小于0.5 mm; 而LPA10和Parsivel激光雨滴谱仪可以监测小到0.001 mm/h强度的弱降水, 并可输出精确到0.01 mm的累积降水量。当累积降水量小于1 mm时, 雨量计的测量误差大于10%, 此时雨滴谱仪与雨量计的误差对比意义不大。在表7中序号2~10次降水中, 雨量计的测量范围在5.9~17.6 mm。LPA10与雨量计的终点绝对值误差在0.68%~6.83%; Parsivel与雨量计的终点绝对值误差在2.29%~25.06%。Parsivel如除去误差较大第2项, Parsivel与雨量计的终点绝对值误差在2.29%~6.78%, 此时Parsivel和LPA10的测量误差数值相仿。在一般降水的误差分析表明: LPA10和Parsivel绝对值误差大部分都在5%左右, 与雨量计的测量数值较为接近。

表5 2016—2017年北京永丰LPA10、Parsivel与雨量计强降雨对比观测

Table 5 Comparing observations for heavy rainfall among LPA10, Parsivel and the rain gauge in Yongfeng for 2016–2017

序号	降水开始日期/年-月-日	LPA10/mm	Parsivel/mm	雨量计/mm	LPA10对雨量计终点误差	Parsivel对雨量计终点误差	持续时间/h
1	2016-7-19	274.78	387.38	288.4	-4.72%	34.32%	38
2	2017-7-6	35.30	38.16	35.4	-0.28%	7.80%	5
3	2017-8-23	41.02	49.02	42.0	-2.33%	16.71%	16

表6 2016—2017年广州和厦门地区LPA10与雨量计强降雨对比观测

Table 6 Comparing observations between LPA10 and rain gauge in Gangzhou and Xiamen for 2016 – 2017

序号	降雨日期/年-月-日	台站	LPA10/mm	雨量计/mm	与雨量计终点误差	持续时间/h
1	2016-4-4	59287	17.03	16.5	3.21%	4
2	2016-4-12	59288	23.03	22.0	4.68%	1
3	2016-5-10	59287	76.52	82.6	-7.36%	2.5
4	2016-8-13	59130	71.67	69.8	2.68%	18
5	2016-7-12	59288	85.43	84.6	0.98%	11
6	2016-7-16	59287	34.89	35.3	-1.16%	1
7	2016-8-2	59287	112.13	108.9	2.97%	12
8	2017-5-7	G3346	198.07	185.2	6.95%	10
9	2017-5-7	59287	148.84	156.2	-4.71%	5
10	2017-8-1	59140	86.23	84.4	2.17%	3.5

表7 2016—2017年北京永丰LPA10、Parsivel与雨量计一般降水对比观测

Table 7 Comparing observations for normal rainfall among LPA10, Parsivel and the rain gauge in Yongfeng for 2016–2017

序号	降水开始日期/年-月-日	LPA10/mm	Parsivel/mm	雨量计/mm	LPA10与雨量计终点误差	Parsivel与雨量计终点误差	持续时间/h
1	2016-6-14	0.25	0.29	0.2	25.00%	45.00%	2
2	2016-7-20	16.55	22.01	17.6	-5.97%	25.06%	8
3	2017-5-22	16.21	17.25	16.7	-2.93%	3.29%	6
4	2017-6-21	14.12	14.32	14	0.86%	2.29%	3
5	2017-7-4	11.46	11.35	12.1	-5.29%	-6.20%	6
6	2017-7-5	6.73	6.63	6.3	6.83%	5.24%	8
7	2017-7-7	12.68	12.57	12.1	4.79%	3.88%	4
8	2017-7-26	12.63	11.28	12.1	4.38%	-6.78%	6
9	2017-8-2	10.07	10.21	9.6	4.90%	6.35%	6
10	2017-8-8	5.86	5.52	5.9	-0.68%	-6.44%	3

## 2.6 强降雨时雨滴谱对比观测

图4记录了位于北京永丰2015年7月22日的一次短时强降雨过程中LPA10和Parsivel的滴谱对比观测情况。图中横坐标为粒子直径，单位为mm；纵坐标为粒子速度，单位为m/s；颜色表示粒子浓度范围数，单位为个；背景参照的“直径vs速度理论曲线”为Atlas-Ulbrich修正曲线（下文简称“理论曲线”），它表征不同粒径的降水粒子与终端速度关系，可作为滴谱分析的参照曲线。

本次降雨风雨交加，记录了强降雨过程中雨滴谱仪的激光透射窗口被淋或溅射到雨水后对滴谱观测的影响情况。图4a、图4b分别为LPA10和Parsivel在19:06的分钟雨滴谱：两设备传感器状态位“0”，表示状态良好，激光透射窗口均未沾水；降水粒子直径分布在0.2~6 mm；降水粒子的直径、速度和数量的滴谱围绕着理论曲线分布，呈现出中间粒子密集两侧逐渐稀疏的分布趋势；除图4b的个别粒子外，其余粒子最大速度值都在11.2 m/s以内。图4c、图4d为两设备传感

器状态位“1”，表示激光透射窗口沾水，即LPA10和Parsivel分别在19:15和19:09先后激光透射窗口沾水的分钟雨滴谱，两图中画圈的粒子为因窗口沾水造成的干扰粒子。雨滴谱仪的激光透射窗口沾水后会造大粒子区域滴谱发散，呈现严重背离理论曲线的趋势。图4e、图4f的设备传感器状态位仍然为“1”，表示在19:29两设备窗口沾水持续一段时间后受影响的滴谱情况。通过理论曲线可知，6 mm雨滴的理论终端速度约为9.6 m/s。图4e的滴谱紧凑地围绕理论曲线分布，最大粒子速度在12.8 m/s左右，图谱形状与图4a类似，表明窗口沾水影响较小。图4f的滴谱较为发散地围绕理论曲线分布；2 mm以上粒子速度大于12 m/s；6 mm左右的粒子速度大于16 m/s；最大粒子直径为10 mm；最大粒子速度大于18 m/s；通过滴谱观察到Parsivel在窗口沾水后雨滴直径和速度均被测大，测量误差极大。

## 3 结论

LPA10激光雨滴谱仪采用接收能量与消光粒子能

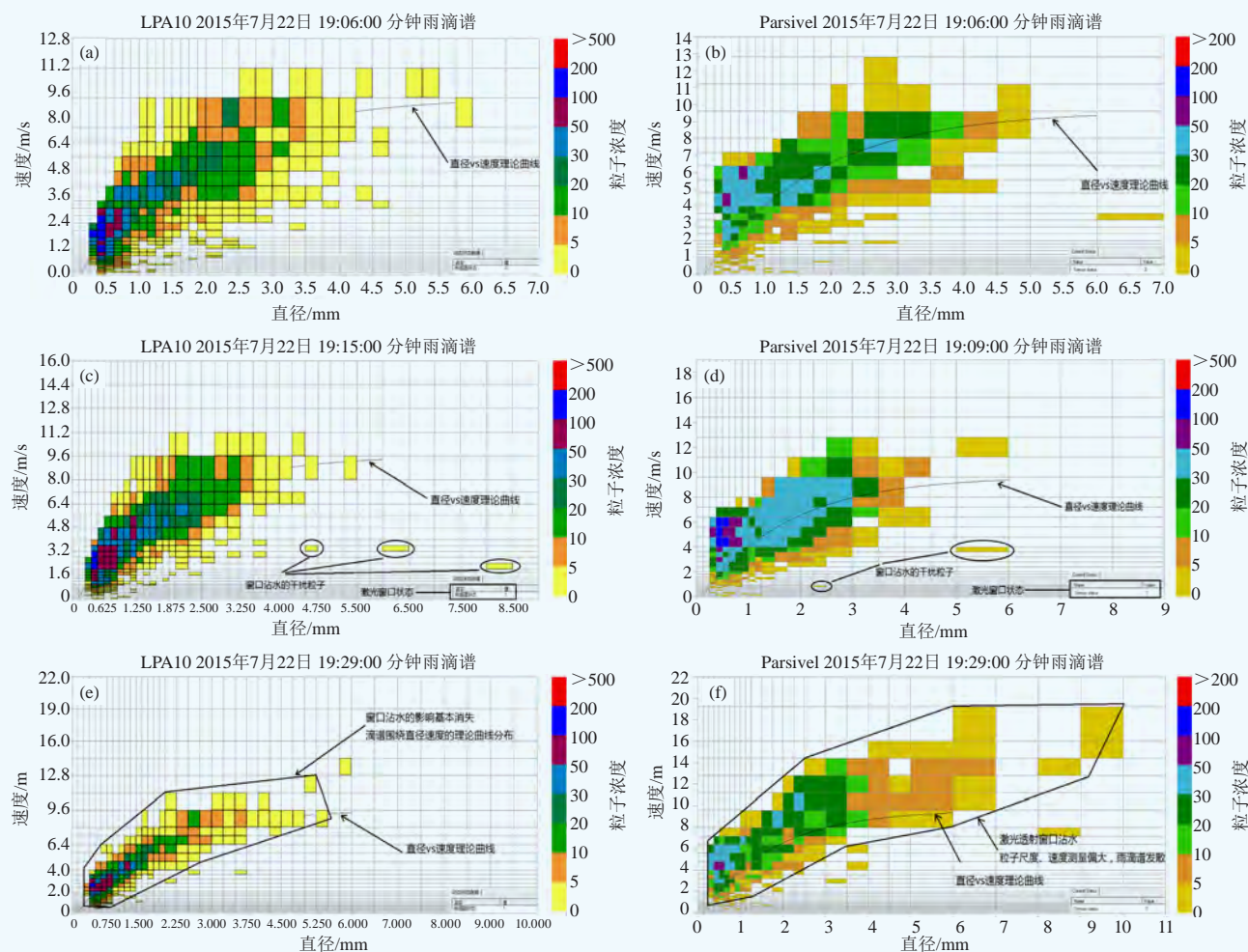


图4 LPA10 (a、c、e) 和Parsivel (b、d、f) 强降雨的雨滴谱对比观测  
Fig. 4 Comparison of the Drop Spectrum during heavy rain between LPA10 (a, c, e) and Parsivel (b, d, f)

量对应成比例的原理，避开了由于光学成像测量系统带来的背景辐射、雨滴形变以及雨滴的透镜效应等诸多干扰因素，使得降水粒子测量简单准确。经过实验室对比检验、降雨量和雨滴谱的实际对比观测，LPA10在测量参数和探测性能方面表现较为出色：

- 1) 测量面积大 ( $63 \text{ cm}^2$ )；测量范围广 (0.1~30 mm)；尺度分级细 (64级)；测量数据的不确定性小。
- 2) 降水量测量精度与雨量计偏差小，尤其是在强降雨情况下，整体绝对偏差在10%以内，大多数情况下绝对偏差在5%以内。
- 3) 配备供台站使用的标定装置可为观测数据的可信性提供帮助。

#### 参考文献

- [1] Robert G K. The optical array: an alternative to scattering or extinction for airborne particle size determination. *Journal of Applied Meteorology*, 1970, 9(2): 86-103.
- [2] 房彬, 郭学良, 肖辉. 辽宁地区不同降水云系雨滴谱参数及其特征量研究. *大气科学*, 2016, 40(6): 1154-1164.
- [3] 濮江平, 赵国强, 蔡定军, 等. Parsivel激光降水粒子谱仪及其在气象领域的应用. *气象与环境科学*, 2007, 30(2): 3-5.
- [4] 王自英, 王仔刚, 赵梅珠. 自动站雨量站资料在地址灾害监测中的应用. *气象科技*, 2009, 37(5): 627-631.
- [5] Anton K, Witold F K. Two-dimensional video disdrometer: a description. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(5): 602-617.
- [6] Thurai M, Petersen W A, Tokay A, et al. Drop size distribution comparisons between Parsivel and 2-D video disdrometers. *Advances in Geosciences*, 2011, 30(3): 3-9.
- [7] Tokay A, Wolff D B, Petersen W A. Evaluation of the new version of the laser-optical disdrometer, OTT Parsivel2. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(6): 1276-1288.
- [8] Graham U, Dan B. An investigation of factors affecting the accuracy of Thies disdrometers. UK: The UK Met Office, 2007.
- [9] Beard K V. Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1976, 33(5): 851-864.
- [10] Merhala T, V N Bringi. Drop axis ratios from a 2D Video Disdrometer. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2005, 22(6): 966-978.
- [11] Thurai M, Szakall M, Bringi V N, et al. Drop Shapes and axis ratio distributions: comparison between 2D Video Disdrometer and wind-tunnel measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(6): 1427-1432.
- [12] Ellis R A, Sandford A P, Jones G E, et al. New laser technology to determine present weather parameters. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(6): 1715-1722.
- [13] 张焱. 一种激光雨滴谱仪, 中国, G01W1/14, CN201310070017. X, 2015-10-07.
- [14] 杜波, 马舒庆, 刘达新, 等. 雨滴谱降水现象仪综合测试系统设计. *气象科技*, 2018, 46(1): 56-63.
- [15] Korolev A V, Kuznetsov S V, Makarov Yu E, et al. Evaluation of measurements of particle size and sample area from optical array probes. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1991, 8(8): 514-522.
- [16] 李淘, 阮征, 葛润生, 等. 激光雨滴谱仪测速误差对雨滴谱分布的影响. *应用气象学报*, 2016, 27(1): 25-34.
- [17] 张焱, 刘强, 李佳. 一种下落粒子的直径测量方法及激光雨滴谱仪, 中国, G01W1/14, CN108225198A, 2018-6-29.
- [18] 张焱, 刘强, 郭光明. 一种下落粒子的直径测量方法及激光雨滴谱仪, 中国, G01W1/14, CN108195294A, 2018-06-22.
- [19] 冯纳敏, 章树安, 徐海峰. GB/T 11832-2002翻斗式雨量计. 水利部, 2002.

## 智能自动气象观测系统和海洋气象漂流观测仪的开发及应用

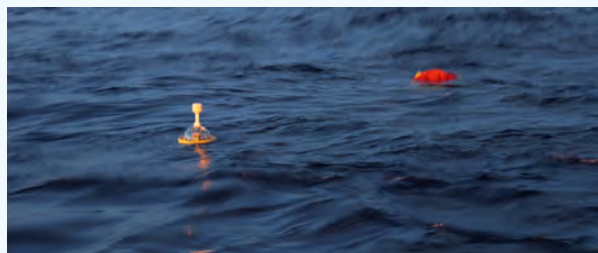
■ 王亚静

为了发展智能观测，推进观测装备的智能化和观测手段的综合化，提高我国地面气象观测水平，2012年12月，由华云集团牵头的科技部重大科学仪器专项“多要素智能气象站的研制与应用”项目获批。经过为期4年的研究工作，项目组顺利完成了研究任务。智能气象站为该项目的研究成果，以自动气象站为基础，利用新技术对常规传感器进行智能化，同时研发了多种特种传感器，可实现地面气象要素全自动、智能化观测。

2014年，华云升达（北京）气象科技有限责任公司联合中国气象局气象探测中心、国家海洋技术中心等单位共同承担了科技部重大科学仪器专项“海洋气象漂流观测仪开发及应用”项目，经过3年多的研发和试验，成功研制了具有自主知识产权、可观测海洋和气象要素、“皮实耐用”的HY-DB1A型海洋气象漂流观测仪，该海洋气象漂流观测仪近年多次进行远海试验，最长运行已经超过8个月。



智能自动气象观测系统示范建设  
(中国气象局大气探测试验基地, 北京南郊)



海洋气象漂流观测仪海上运行

(作者单位: 华云升达(北京)气象科技有限责任公司)