

地面“云能天”自动化观测进展

余万明¹ 叶成志² 杨晓武¹ 刘炼焯² 王胜春³ 傅承浩²

(1 中国气象局, 北京 100081; 2 湖南省气象局, 长沙 410118; 3 湖南师范大学, 长沙 410081)

摘要: 介绍了国外地面气象观测自动化情况, 回顾了我国地面气象观测自动化发展历程, 特别是地面“云能天”自动化观测相关仪器设备与技术方法, 并对我国近年来研发应用的云和多种天气现象综合判识产品、天气现象视频智能观测仪原理和效果进行了阐述。指出地面“云能天”观测技术的发展仍取决于观测仪器与方法的发展, 在现有的自动化观测基础上开展智能化观测、社会化观测是未来地面“云能天”观测的发展方向。

关键词: “云能天”地面气象观测, 自动化, 智能化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.05.004

Current Situation and Development Trend of Automatic Weather Observation System for Cloudy, Visibility and Weather Phenomena

She Wanming¹, Ye Chengzhi², Yang Xiaowu¹, Liu Lianye², Wang Shengchun³, Fu Chenghao²

(1 China Meteorological Administration, Beijing 100081 2 Hunan Meteorological Bureau, Changsha 410118

3 Hunan Normal University, Changsha 410081)

Abstract: In this paper, the development of automation for the surface meteorological observation in foreign countries is introduced, and then the domestic development in this field, especially the products and technologies of the automatic weather observation systems for cloudy, visibility and weather phenomena are reviewed as well. Furthermore, principles and effects of cloud and multi weather phenomenon comprehensive identification products as well as weather phenomenon video intelligent observation instrument that have been developed and applied in recent years in China are discussed and analyzed. It is pointed out that the development of surface meteorological observation technology still depends on the development of observation instruments and methods. Based on the existing automatic observation, intelligent observation and socialized observation are the direction of the future development of surface meteorological observation.

Keywords: “cloud, visibility, weather phenomena” surface meteorological observation, automation, intelligent

0 引言

地面气象观测是气象观测的基本途径, 指在地面上以目力或仪器对近地面层的大气状况和天气现象进行的观测^[1], 是天气监测与天气预报^[2]、气候分析及预测^[3-4]等工作的基础。地面气象观测通常观测的项目有云、能见度、天气现象、温度、湿度、气压、风、降水、积雪、蒸发、辐射能、日照时数等要素^[5]。随着电子、计算机、人工智能等技术不断发展, 传统的依靠人工开展的地面气象观测业务逐渐向自动化、智能化转变, 地面观测的时间、空间密度以及观测资料的稳定性、可用性都有了不断提高。

我国幅员辽阔, 地广人多, 是世界上气象灾害最为严重的国家之一, 尤其在目前全球气候变暖的大

背景下, 高温、干旱、暴雨、强对流、寒潮、冰冻等气象灾害呈频发、多发、重发的趋势, 严重影响我国工业、农业、军事、国民经济发展, 因此, 加快地面气象观测技术、手段的进步, 实现自动观测和智能观测, 对气象防灾减灾至关重要。

国际上, 以美国为代表的发达国家或地区业已建成了以自动观测为主的地面气象观测系统。我国历经多年的发展, 地面气象观测能力和水平不断提升, 于2020年4月1日正式开展了地面气象观测自动化改革业务运行, 实现了基本气象要素的观测自动化, 并开展了云和多种天气现象的智能视频观测, 是气象观测划时代、里程碑式的历史性成就, 对我国实现从气象观测大国向气象观测强国的转变有重要意义。

1 国外“云能天”观测自动化情况

20世纪50年代末, 苏联、美国等国家有了第一

收稿日期: 2022年2月8日; 修回日期: 2022年5月26日;

第一作者: 余万明, Email: wmshe@163.com

代自动气象站，但是结构简单、观测要素少、准确度低。60年代中期的第二代自动气象站能够适应各种比较严酷的气候条件，但未能很好地解决资料存储和传输问题，无法形成完整的自动观测系统。70年代的第三代自动气象站大量采用了集成电路，实现了软件、硬件模块化，单片机的应用使自动气象站具有了较强的数据处理、记录和传输能力，并逐步投入业务使用。进入90年代以后，自动气象站在许多发达国家得到了迅速的发展，建成了业务性的自动观测网，如美国的自动地面观测系统（ASOS）、日本的自动气象资料收集系统（AMeDAS）、芬兰的自动气象观测系统（MILOS）和法国的基本站网自动化观测系统（MISTRAL）等。本文以ASOS为代表，介绍国外地面观测业务，特别是“云能天”观测的自动化现状及其特点。

ASOS (Automated Surface Observing System) 是由美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)、民航局 (Federal Aviation Administration, FAA) 和国防部 (Department of Defense, DOD) 共建的一个地面自动观测系统。是美国目前地基气象观测的骨干和国家发报站网 (图1)。其观测和分析判识的基础是多种针对不同观测目标的传感器和设备，如：冰冻传感器、闪电定位仪、云高仪等，通过传感器和设备收集到高精度、高分辨率的数据，经过质量控制和智能算法，对特定观测任务完成具有较高精度的判识和数据采集。除了极少数几个重要城市、机场、港口外，均无人值守^[6]，全部实现自动化。三个部门的需求有共同点，也有不同点，ASOS的设计较好地满足了三个部



图1 ASOS站点分布图
Fig. 1 ASOS site distribution map

① 1 ft为0.3048 m.

门的共同需求，观测要素包括世界气象组织 (World Meteorological Organization, WMO) 规范中要求的基本项目，也有天气现象如雾、能见度、云量、云高、有无雷电等等。ASOS系统是1991年正式和工厂签约投产，20世纪90年代后期起陆续投入业务，此后一直在不断完善、不断发展，主要表现在更新传感器、扩展系统功能方面^[7-8]。

1.1 云的自动观测

在ASOS中，通过激光云高仪完成云底高度和云量的自动化测量。设计初期采用的是测量高度12000 ft^①的激光云高仪CL25K，后来更新为测量高度为25000 ft的激光云高仪CL31^[9]。激光云高仪能比较精确地测量云的高度，但由于每次是单点测量，且只能是对天顶方向的云进行测量，因此云量的测量是对不同高度的云进行时间积分，然后通过计算积分量来确定。

此外，CL51激光测云仪、SkyVUEPRO激光测云仪、Ka段毫米波测云仪、ACP30000毫米波测云仪、EKO全天空成像仪等自动测量设备也用于云的自动观测。其中CL51激光测云仪采用增强型单镜头新技术，使得测量范围可达13 km，且在低海拔地区也具有卓越的测量性能^[10]。SkyVUEPRO激光测云仪采用精密的分镜头技术，获得高信噪比，在保证仪器测量精度的同时扩展仪器观测范围。Ka段毫米波测云仪采用全固态、单发双收线极化、脉冲压缩多普勒技术，保证了超强的测量分辨率、测量精度和检测性能^[11]。ACP30000毫米波测云仪采用全固态脉冲多普勒双偏振体制，能探测在15~30 km高度范围内高时空分辨率的云分布信息^[12-14]。EKO全天空成像仪运用180°广角高分辨率传感器，可记录全天候的全天空云状信息，并可设置天顶角范围、屏蔽区域、感兴趣区域等参数，避免遮挡物影响云量计算^[15-16]。

1.2 能见度的自动观测

在ASOS中，能见度的自动观测主要采用前向散射能见度仪，但同时ASOS的采集控制单元也与机场的透射能见度仪相连，将透射能见度仪与前向散射能见度仪的观测数据都存储在采集控制单元中，提供给业务部门和服务人员使用。

在能见度自动观测领域陆续推出TSAVS能见度传感器、VS8364能见度传感器等自动测量设备。其中，TSAVS能见度传感器采用气溶胶前散射技术，除拥有前散射仪器的所有性能特点外，还能提供100 m以内准确的实时能见度。VS8364能见度传感器采用双光

路对称设计,其不仅具有散射型传感器的优点又能避免光学污染的干扰,并且在中远距离提供较高的感测精度^[17-19]。

1.3 天气现象观测

ASOS观测系统的天气现象观测实现了自动观测,但ASOS观测的天气现象种类是根据上述三个部门的需求确定的,而不是按照WMO的要求而定。ASOS通过常规和专用传感器直接测量,并在此基础上对多个观测要素值进行综合判识,实现相关天气现象的自动化观测。

在ASOS中自动观测的天气现象有:1)降水天气现象:雨、雪、阵雨、阵雪和雨夹雪;2)视程障碍天气现象:雾、轻雾和霾;3)凝结天气现象:雨淞、雾淞;4)雷电天气现象:雷暴;5)其他天气现象:大风、飏。

所用于天气现象的专用传感器有:1)降水类型识别传感器。其关键部件主要由红外发光管和红外接收管阵列构成。红外发光管发出光束,接收管阵列接收,当降水粒子通过光束时,将改变接收信号。通过对接收信号的分析,得到降水粒子的下落速度、大小和降水类型。2)雷暴传感器。由光电传感器和电磁传感器构成。光电传感器接收雷暴产生的光信号。电磁传感器实际就是一个无线电接收机,接收雷暴产生的电磁波。有光信号同时也有电磁波信号时,记录一个雷暴。3)冻雨传感器。由一个带有1 in^①长探针的电子震动装置构成。探针上不结冰与结冰时震动频率不同,通过分析震动频率判断是否在探针上有积冰。

上述三种专用传感器的测量结合其他常规传感器的测量,进行综合判识,即可实现前述五类天气现象的观测,且基于站点完成。即:第一类降水天气现象采用降水类型识别传感器和降水传感器判识;第二类视程障碍天气现象,如:雾、轻雾和霾,通过能见度和空气湿度观测值判识;第三类凝结天气现象采用冻雨传感器和温度、降水资料判识;第四类雷电天气现象采用雷暴传感器获取;第五类其他天气现象,如:大风、飏,通过风、温度等观测数据进行判识。

2 我国“云能天”观测自动化情况

2.1 地面气象观测自动化发展历程

我国地面气象观测自动化技术研究始于20世纪50年代后期,是在学习美国和芬兰等发达国家自动气象观测站的基础上开展的自主研发设计,伴随着现代电子测量、自动控制、通信网络等新技术快速发展,国

产自动气象站技术也逐渐成熟,到20世纪90年代中期,中小尺度天气自动气象监测站网在长三角、珠三角地区建站运行。90年代后期,国内第一代自动气象站设计定型,并获准在业务中使用,开始在全国地面气象观测台站进行布网建设。2009年全国2400多个地面气象观测站全部实现了温度、湿度、气压、风速、风向、雨量等基本气象要素的观测自动化,观测准确度达到世界气象组织观测要求。

自动气象站仅解决基本气象要素的观测自动化,部分观测项目(如云、能见度、天气现象等)的自动观测还需通过其他手段实现。我国自2010年以来,依托能见度自动观测仪、降水天气现象仪、激光云高仪、天气现象视频智能观测仪等一系列自动化仪器设备^[20],以及云和多种天气现象综合判识算法的研发应用,先后在国内2400余个国家级地面气象观测站实现了对“云能天”等项目的自动观测,特别是天气现象视频智能观测仪的研发应用,将我国地面观测带入了智能化时代。

2.2 “云能天”相关观测自动化仪器和技术手段

地面气象观测的自动化发展主要取决于气象观测仪器的发展,而气象观测仪器的发展主要是依托气象观测传感器、自动气象观测设备和多源资料综合判识技术的发展。

2.2.1 云的自动气象观测设备

地面气象观测方法的发展是地面气象观测技术和仪器发展的强有力支撑。常规“六要素”测量方法通常采用接触式,即将传感器置于被测物质中。“云能天”的观测长期以来主要依靠人工目测的方法,由于这些项目较为复杂,人工观测存在主观性强、观测频次低、测站分布稀疏、投入及维护成本高且无法回溯等问题。为此,中国气象局提出综合气象观测需要改变以人工观测为基础的传统发展思路,大力推进观测模式智能化,发展天气实况自动判识能力。

云的观测要素主要有云高、云量、云状三类。

激光云高仪(图2)较早应用于对云高的自动观测。其通过发射脉冲激光并接收云层的激光回波信号,获取整个探测路径上的高空间分辨率的激光大气回波廓线,以此确定观测点上空是否有云并得到云高。

毫米波测云仪(图3)采用毫米/微波相关波段,可以得到非降水回波及弱降水回波特征,除云高、云厚等宏观信息外,还能够观测部分薄云内部粒子特征,获取滴谱分析、液态含水量等微观信息。但和

① 1 in=25.4 mm。



图2 芬兰维萨拉生产的CL31激光云高仪
Fig. 2 CL31 Laser Ceilometer made in Vaisala, Finland



图3 观测场中的毫米波测云仪
Fig. 3 Millimeter wave cloud meter in meteorological observation field

激光云高仪一样，毫米波测云仪以观测云的局部特征为主^[21-22]。

测量云高的方法还包括红外测云仪，该仪器通过红外传感器测量云底亮温，再通过大气辐射传输方程反演云高；双成像云高仪也可通过双目测距的方式计算云底高度^[23]。

云量的测量包括早期美国Yankee公司的总天空成像仪（图4），通过照相机垂直向下拍摄带有加热装置的半球镜面，得到当时天空可见光辐射分布，并将结果自动存储到业务终端进行云量计算和处理得到天空云量。

随着技术的发展，点阵式红外测云仪与面阵式红外测云仪能获取昼夜的全天空云底亮温，经过



图4 TSI-800总天空成像仪
Fig. 4 TSI-800 Total Sky Imager

天顶角修正、球面投影、水汽修正等方式可获得全天空的红外辐射分布，再进行分割处理，可获取云量信息。华云升达（北京）气象科技有限责任公司的DUH2型云量自动观测仪（图5）包含了可见光波段及8-14um的红外波段^[24]，可实现昼夜的云量自动测量。



图5 DUH2云量自动观测仪
Fig. 5 DUH2 Automatic cloud observation instrument

对于云状的观测，在天气现象智能观测仪部署前，多以云图的纹理特征、位置等信息分类研究为主，对象多为有代表性的云属及类别，数量不超过10类，未实现对WMO规定的全部29类云状的自动观测。

2.2.2 能见度的自动气象观测设备

传统的能见度观测依赖人工目测，其观测数值主观性强，无法做到量化、标准化。目前业务中已采用前向散射能见度传感器、透射式能见度传感器等测定一定基线范围内的气象光学视程，以此作为能见度的观测值。由于透射能见度传感器需要较长的基线，占地面积大^[22]，目前我国地面观测业务中以使用前向散射能见度传感器（图6）为主。



图6 前向散射能见度传感器
Fig. 6 forward scattering visibility sensor

2.2.3 降水天气现象的自动气象观测设备

2017年我国陆续在2400余个国家级地面气象观测站完成了降水天气现象仪的安装，2020年4月正式开始单轨业务运行。该仪器通过测量不同降水粒子粒径和下落末速度，分析其分布关系得到降水类型，可较

准确地实现毛毛雨、雨(阵雨)、雪(阵雪)、雨夹雪(阵性雨夹雪)、冰雹、霰等多种降水类天气现象的自动观测与识别。

2.2.4 “云能天”的多源资料综合判识

天气现象与温度、气压、风、降水量等气象要素密切相关，云量和云底高度可通过卫星遥感和气象要素计算等手段获取，风云四号卫星闪电成像仪也投入业务运行，地基云闪观测网也已基本覆盖全国^[25-27]。在此基础上，利用温、压、湿、风等气象要素资料和卫星、雷达资料，通过统计方法建立基于多源数据资料的综合判识模型，可以实现对特定天气现象或观测项目的综合判识。近年来，利用多种自动化观测仪器及“云大物联智”等信息化技术手段，我国气象部门深入开展了综合气象观测智能判识新技术研究应用和相关标准制订。

2014年我国能见度自动观测正式业务运行的台站率先实现了视程障碍类天气现象(包括雾、轻雾、霾、浮尘、扬沙、沙尘暴)的自动综合判识。此外，自2014年以来，湖南省气象局地面智能气象观测团队(简称湖南智能观测团队，下同)构建了物理意义明确、综合考虑区域特点的云和多种天气现象综合判识模型，2018年通过了中国气象局的业务准入，2020年起正式业务运行，通过多源资料综合判识方法实现了全国2400余个国家级观测站逐小时的总云量、云高、露、霜、结冰、雷暴、雨淞、雾淞、积雪等项目的自动观测。

中国气象局于2019年印发实施的《地面气象自动观测规范(第一版)》，第一次将“多源观测数据综合判识”列为观测手段^[25]。

2019年以来，中国气象局多次组织了对多源资料综合判识产品的准确性评估。对2018年11月15日至2019年11月14日的综合判识产品评估结果(表1)表明，大部分项目的判识结果与人工观测相比一致率较高。云量的判识基于卫星云产品，因观测原理不同于地面观测，其数值与人工观测相比一致率不高，但变

表1 综合判识产品与人工观测一致率

Table 1 consistency rates of comprehensive identification products and Manual Observations

判识项目	一致率/%	判识项目	一致率/%
云量	67.3	轻雾	93.7
云高	79.8	霾	97.9
露	65.6	浮尘	99.8
霜	90.9	扬沙	99.9
雨淞	99.3	沙尘暴	100.0
雾淞	99.7	积雪	96.5
雾	99.8	结冰	95.3

化趋势与实际一致，在面向预报业务的应用中有较好的效果^[27]。

2.2.5 天气现象视频智能观测仪

自2012年以来，随着人工智能技术的发展，AlexNet、ResNet、Xception、SENet等深度神经网络模型^[28-31]在海量数据的基础上，针对图像的分类相关问题，在大批量、多类别、高精度三个维度均取得了重要进展，使得基于图像、视频的“云能天”自动观测在技术上成为可能，对积雪、雨淞以及云量、云状等项目的图像识别也取得了实用性的成果^[32,33]。

2019年5月，中国气象局组织公布了《天气现象视频智能观测仪技术要求》，6—8月组织开展了仪器的专项测试，共有六个厂家、七款设备参加测试。参试设备均采用多个摄像机对特定目标物进行图像采集，并配备搭载图像识别算法的独立处理器，实时输出观测结果。

由湖南智能观测团队牵头技术研发，华云升达(北京)气象科技有限责任公司生产的HY-WP1A、HY-WP1B两种型号设备在运行稳定性、观测结果准确性等方面完全满足技术要求，最终通过测试。其中HY-WP1A型天气现象视频智能观测仪(图7)于2019年底开始先后在全国2344个国家气象观测站安装布设，并于2020年9月投入业务试运行，计划于2022年正式业务运行。



图7 天气现象视频智能观测仪(安装于广西南宁气象观测站)
Fig. 7 Weather phenomenon video intelligent observation instrument (installed at Nanning Observation Station, Guangxi)

“天气现象视频智能观测仪”是由多个不同观测角度的视频采集器和控制处理器组成的一体化设备，并

集成深度学习加速计算芯片，结合基于图像、时空序列信息和气象要素信息的多源融合AI识别算法模型，实现了高时空分辨率的全天空、全景、全天候的密集自动观测，可实时输出云量、云状、雨淞、雾淞、结冰、积雪、雪深、露、霜等项目的自动观测结果^[32-34]。

为评估仪器观测效果，湖南省气象局组织了省内14个观测站开展人工对比观测。根据统计，2020年4月1日至2021年6月20日，天气现象视频智能观测仪与人工观测对比评估结果如表2所示。此外，在湖南省2020年12月13—14日寒潮过程期间，天气现象视频智能观测仪对积雪观测的一致率为98.4%、结冰为96.1%、雨淞为99.6%，雾淞为99.9%。在2022年2月21—22日湖南省大范围暴雪天气过程期间，对湖南省97个地面观测站积雪和积雪深度观测的一致率分别为93.3%和90.8%。各项项目视频观测的准确率整体优于综合判识算法，特别是对云的观测优势明显，但暂未解决对云的夜间观测问题。

表2 视频观测结果与人工观测对比评估情况 (2020年4月1日至2021年6月20日)

Table 2 Consistency between video observation and manual observation (1 April 2020 to 20 June 2021)

判识项目	一致率(PC)/%	命中率(POH)	漏判率(PO)	空判率(FAR)
总云量	95	/	/	/
云状	91	/	/	/
露	92	0.90	0.06	0.10
霜	94	0.90	0.09	0.10
雨淞	98	1.00	0.06	0.00
雾淞	95	0.96	0.08	0.04
结冰	95	0.95	0.05	0.05
积雪	99	0.98	0.01	0.02
雪深	91	/	/	/

与一般图像分类问题相比，对天气现象的图像识别更为复杂与多变。天气现象视频智能观测仪采用了标准化的目标物，制订了严格的安装和摄像机调试规范，但不同气候特征、不同光照、不同下垫面条件的差异仍然给观测效果带来了一定程度的影响^[32]。为解决此问题，在构建识别模型的过程中，运用了多类经典深度神经网络模型，也融入了多源气象要素与时空序列信息来辅助对不同天气现象进行更精确的识别。此外，随着时间推移，不同背景条件下的典型样本数量增多，针对不同区域特点构建差异化的识别模型，也可有效提高天气现象视频智能观测仪观测效果。

3 地面“云能天”自动化观测新探索

3.1 智能化观测

地面气象观测智能化不仅包含气象观测自动化技术，还结合物联网技术、现代电子技术、通信技术

等，向着自组网、自适应、自管理等无人化、精准化、智能化方向发展。未来气象观测站点必将越来越密集，一定区域内的站点可自动连接成网络环境，互为备份、相互校验，并实现复杂环境下的设备运行自动监控、报警等。

智能化观测优势还在于可对“云能天”等难以通过传统传感器直接观测的项目进行有效、准确的自动观测。随着计算机信息技术的发展，通过大数据分析与人工智能技术应用，可极大提高基础气象数据的应用效率，降低观测成本。前文提到的多源资料综合判识、基于视频图像识别的自动观测技术都可纳入智能化观测的范畴^[35-37]。

湖南智能观测团队针对夜间云和能见度的智能化观测开展了一些有益的探索。

3.1.1 云量、云状夜间观测探索

基于日间云量云状视频观测取得的进展，湖南智能观测团队利用地基红外云图，在解决夜间云观测的问题上提出了一种标准度量神经网络模型(图8)。

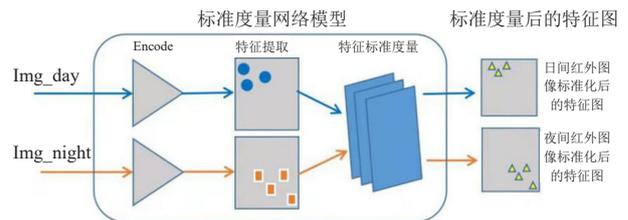


图8 红外云图的标准度量网络示意图

Fig. 8 Standard metric network model for infrared cloud image

将日间红外云图和夜间红外云图同时作为输入，通过图像特征提取和标准化度量后，将两者映射到统一的度量标准化空间里，消除了两者原本的属性差异，并且保留了各自原有的特征。再以日间基于可见光的识别模型与人工先验标签为指导，统一日间、夜间云观测模型，以此实现夜间对云量、云状的智能观测(图9)。同时探索以多光谱融合技术对不同高度的云进行立体建模。从三维立体模型中可以看出，不同高度的云在三维空间中的位置差异很大，辨识度高。将对云的智能识别从二维空间扩展到三维立体点云空间中。从而使得精确划分各类云状边界，精细识别各高度的分云量成为可能。

3.1.2 能见度智能化观测探索

现有能见度观测仪器在局部有雾及大气环境污染较严重的情况下与人工观测差异较大。由于大气中颗粒物分布并非均匀，且大气中的颗粒物浓度与能见度实质呈现较好的反相关性，所以在大气颗粒物浓度越高的时候，人工观测的能见度数值就越接近真实

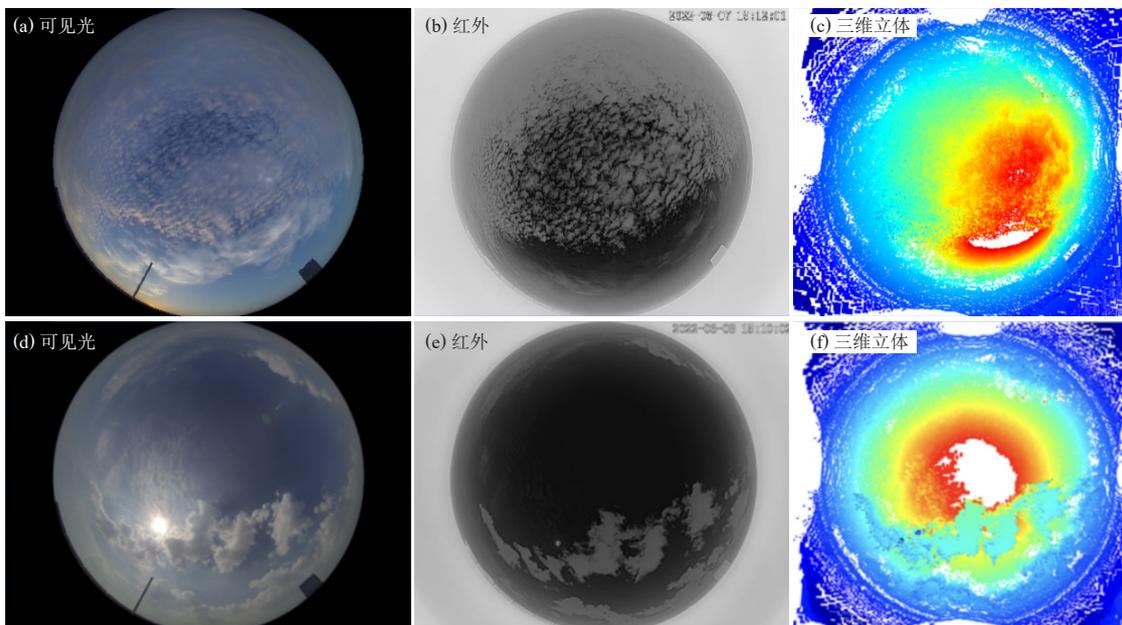


图9 2022年6月7日18:12:01地基云图(a~c)和2022年6月8日 18:10:02地基云图(d~f)
(采集于长沙综合气象观测试验基地)

Fig. 9 Ground-based cloud image collected at 18:12:01 BT 7 June 2022 (a-c) and ground-based cloud image collected at 18:10:02 BT 8 June 2022 (d-f) (Collected in Changsha comprehensive meteorological observation test base)

大气能见度值，而能见度仪观测的数值相对于真实值偏小^[38]。

为解决此类问题，西班牙和美国阿拉斯加在利用视觉图像中的边缘信息计算能见度进行了一些探索^[39-40]，但局限性还是很大。

湖南智能观测团队利用计算视觉技术，结合其他传感器资料，对雾的局部浓度进行视频观测，使在浓雾及重污染天气情况下的能见度观测值更接近人眼观测的目视能见度。该技术与现有能见度仪器结合，在团雾、碎雾、部分雾等情况下可测得更为精准的能见度值，并可将来能见度、视程障碍类天气现象的观测由点拓展到面，对各方向的目视能见度进行精准的观测(图10)。



图10 雾的局部浓度视频观测示意图
Fig. 10 Video observation of local concentration of fog

3.2 社会化观测

专业地面观测的特点是空间密度小、观测精度高、数据延续性好，因此专业地面气象观测更主要是保证其准确性和稳定性。

现代气象预报、服务业务向地面观测提出了更高的要求，专业地面观测在时空密度上逐渐不能满足需要。在这种情况下，社会化观测的概念和相关技术、产品逐渐发展，其特点是小型化、便携化、移动化、通用化，重视观测的时空密度，如目前的移动气象站、智慧路灯，以及智能手机内置的温度、气压传感器等，均可作为社会化观测的数据来源。此外，利用城市中大量联网的交通、安防摄像头，结合图像识别技术，可以实现大范围实时的天气现象监测。社会化观测数据通过统一的汇集、分析，可以向社会直接提供信息服务，并有助于预报准确性的提高。

4 地面“云能天”智能化观测发展趋势与展望

从地面气象观测技术发展历程来看，地面“云能天”自动化观测的基础在于气象传感器的发展以及各类新技术应用。面对“智慧气象”、“全球气象”建设需求，气象观测装备将迎来再一次的更新换代，朝着智能化、微型化、信息化、网络化、全球化方向迈进。

近年来，嵌入式技术突飞猛进。国外如英伟达、谷歌、英特尔，国内如华为、景嘉微等硬件厂商角逐

人工智能领域的至高点，不断推出集成有CPU+GPU、CPU+NPU、CPU+VPU的嵌入式核心模块，集成度越来越高、算力越来越强、性价比日益凸显。因此，应把握全球科技创新趋势和气象业务发展需求，根据现代电子技术、材料技术、信息技术快速更迭的特点，推动气象探测与成熟应用型新技术融合，在气象专用芯片及核心传感器上加大自主可控的研究步伐，加快“产、学、研、用”一体的气象观测技术研发，加强和鼓励高校和科研机构与气象部门、知名企业开展全方位、多层次、高水平的气象观测技术合作，积极融入全球气象科技创新，以推动气象观测特别是“云能天”智能化观测新技术的高质量发展。

参考文献

- [1] 孙学金, 王晓蕾, 李浩, 等. 大气探测学. 北京: 气象出版社, 2009: 75-95.
- [2] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近50年来中国气候变化特征的再分析. 气象学报, 2004, 62(2): 228-236.
- [3] 梁苏洁, 丁一汇, 赵南, 等. 近50年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究. 大气科学, 2014, 38(5): 974-992.
- [4] 行鸿彦, 张金玉, 徐伟. 地面自动气象观测的技术发展与展望. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(10): 1534-1542.
- [5] 陈冬冬, 郭建侠, 林立锋, 等. 我国气候观测台的现状与发展思考. 气象科技进展, 2019, 9(4): 62-66.
- [6] 骆继宾. 美国现行的地基气象观测系统. 气象, 2008, 34(1): 114-117.
- [7] 宇如聪, 王晓云, 曹晓钟, 等. 中国气象局地面观测代表团访美考察报告. 气象科技合作动态, 2011, 6: 1-19.
- [8] Nadolski V L. Automated Surface Observing System (ASOS) user's guide. NOAA, U. S. Department of Defense, Federal Aviation Administration, U. S. Navy, 1998.
- [9] Kotthaus S, et al. Recommendations for processing atmospheric attenuated backscatter profiles from Vaisala CL31 ceilometers. Atmospheric Measurement Techniques, 2016, 9(8): 3769-3791.
- [10] Šálek M, Szabó-Takács B. Comparison of SAFNWC/MSG satellite cloud type with Vaisala CL51 ceilometer-detected cloud base layer using the sky condition algorithm and Vaisala BL-view software. Atmosphere, 2019, 10(6): 316.
- [11] Zheng J F, Zhang P W, Liu L P, et al. A study of vertical structures and microphysical characteristics of different convective cloud-precipitation types using Ka-band millimeter wave radar measurements. Remote Sensing, 2019 11(15), doi: 10.3390/rs11151810.
- [12] Zhou Q, Zhang Y, Li B, et al. Cloud-base and cloud-top heights determined from a ground-based cloud radar in Beijing, China. Atmospheric Environment, 2019, 201: 381-390.
- [13] 倾鹏程, 陶法, 胡树贞, 等. 联合毫米波测云仪和全天空成像仪云分类方法. 广东气象, 2022, 44(2): 73-77.
- [14] 仲凌志, 刘黎平, 葛润生. 毫米波测云雷达的特点及其研究现状与展望. 地球科学进展, 2009, 24(4): 383-391.
- [15] Kuhn Pacal, Nouria B, Wilberta S, et al. Determination of the optimal camera distance for cloud height measurements with two all-sky imagers. Solar Energy, 2019, 179: 74-99.
- [16] Dev S, Savoy F M, Lee Y H, et al. Estimation of solar irradiance using ground-based whole sky imagers. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), China Beijing, 2016: 2153-7003.
- [17] Czarnecki T, Perlicki K, Wilczewski G, et al. Atmospheric visibility sensor based on backscattering using correlation coding method. Optical and Quantum Electronics, 2015, 47: 771-778.
- [18] Chan P W. A test of visibility sensors at Hong Kong International Airport. Weather, 2016, 71(10): 241-246.
- [19] Czarnecki T, Wilczewski G, Perlicki K. New atmospheric visibility optical sensor based on correlation coding method. Symposium on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry and High-Energy Physics Experiments, Warsaw, Poland, 2014.
- [20] 王亚静. 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. 气象科技进展, 2018, 8(6): 70.
- [21] Lhermitte R. A 94-GHz Doppler radar for cloud observations. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1987, 4: 36-48.
- [22] Hamazu K, Hashiguchi H, Wakayama T, et al. A 35 GHz scanning Doppler radar for fog observations. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(7): 972-986.
- [23] 杨映, 王小力. 双成像云底高测量系统的研究. 激光与红外, 2019, 49(2): 194-197.
- [24] 高大长, 刘磊, 赵世军, 等. 全天空测云技术现状及进展. 应用气象学报, 2010, 21(1): 101-109.
- [25] 中国气象局. 地面气象自动观测规范. 北京: 气象出版社, 2020.
- [26] 朱华亮, 温华洋, 华连生, 等. 基于Logistic回归建立霜自动判别模型. 中国农业气象, 2019, 40(8): 534-542.
- [27] 刘炼烽, 兰明才, 朱歆炜, 等. FY-2G卫星两种云订正产品在湖南的对比分析. 暴雨灾害, 2017, 36(2): 164-170.
- [28] Krizhevsky Alex, Sutskever Ilya, Hinton Geoffrey. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Communications of the ACM, 2017, 60(6): 84-90.
- [29] He K M, Zhang X Y, Ren S Q, et al. Deep residual learning for image recognition. 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA, 2016.
- [30] François C. Xception: deep learning with depthwise separable convolutions. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Honolulu, HI, USA, 2017.
- [31] Jie S, Samuel, et al. Squeeze-and-Excitation Networks. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2019.
- [32] Liu L, Lv B, Xu J, et al. Automatic observation experiment of cloud amount and cloud form based on image recognition. Chengdu: International Conference on Meteorological Observations, 2019.
- [33] 黄小玉, 张磊, 叶成志, 等. 地面积雪天气现象人工智能观测识别研究. 气象, 2019, 45(9): 1189-1198.
- [34] Huang Xiaoyu, Ye Chenzhi, Cai Ronghui, et al. Application of artificial intelligence on the image identification of icing weather phenomena. ICSINC: Signal and Information Processing, Networking and Computers, 2018: 559-569.
- [35] Sinitsyn A V, Gulev S K. Comparison of field and satellite data on the total cloudiness for the Atlantic Ocean in the period 2004-2014. Oceanology, 2022, 62(1): 1-7.
- [36] Fei L S, Sia Y Y, Dilshani M. Development of cloud movement prediction method for solar photovoltaic system. Journal of Harbin Institute of Technology: English Edition, 2022, 29(1): 64-69.
- [37] Magnone L, Sossan F, Scolari E, et al. Cloud motion identification algorithms based on all-sky images to support solar irradiance forecast. 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). Washington, DC, USA, 2017.
- [38] 吴世美, 吴有恒. 人工与自动大气能见度观测的对比分析. 贵州气象, 2016, 40(4): 81-85.
- [39] Salcedo-Sanz S. Statistical Analysis and machine learning prediction of fog-caused low-visibility events at A-8 motor-road in Spain. Atmosphere, 2021, 12(6): 679.
- [40] Carley J R, Matthews M, Morris M T, et al. Variational assimilation of web camera-derived estimates of visibility for Alaska aviation. Experimental Results, 2021, 2, doi: https://doi.org/10.1017/exp.2020.66.