

全天空测云技术现状及进展

高太长¹⁾ 刘 磊¹⁾ 赵世军¹⁾ 孙学金¹⁾²⁾ 刘 剑³⁾

¹⁾(解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

²⁾(北京大学物理学院, 北京 100871) ³⁾(中国人民解放军第 68028 部队, 兰州 730058)

摘 要

云是一种常见和重要的天气现象,在大气辐射传输中扮演着重要角色。云的形态、分布、数量及其变化标志着大气运动的状况。云的观测对军事活动、国民经济和社会服务等方面具有重要意义。目前在业务上尚未实现云的自动观测,单点测量云高的仪器已经较为成熟,然而云量和云状的自动观测仪器目前还处于研究阶段。文中总结了目前地基全天空测云仪器现状,分析了全天空云图获取、镜头保护、云点识别、云量计算、云高计算和云状识别等几个测云技术问题,最后从相关测量技术和产品应用角度做一定的思考和展望,认为需要从提高仪器性能、加强云高测量技术攻关、建立器测云分类标准等方面推进全天空测云仪器业务化应用。

关键词: 云; 全天空; 测云技术

引 言

云是大气中热力过程和动力过程的外部表现,同时也是水分循环的重要环节。云在地气辐射平衡中具有重要作用,对气候模式和天气预报有着重要影响。由于云在大气科学研究中的重要性和观测的复杂性,在观测规范中将云作为一种特殊的天气现象单独归类进行观测。

云量、云状和云底高是气象业务中云观测的三要素,也是分析云资料时的重要统计内容。然而,目前云的观测主要依靠人工目测进行。每个台站都要专人每小时进行云的观测,这一方面要耗用巨大的观测成本,另一方面,由于各台站观测人员水平不一,会造成资料的不一致。人工目测云量和云状的主观成分较大,同时云体本身在不断运动和变化,不能构成完整的、规则的几何图形,这就对观测者正确判断云量的多少带来一定难度。对于云状的观测根据云的结构形态、透光程度、形成原理和发展变化规律等^[1],大致能判断准确,但在夜间和垂直能见度较差时则较难准确目测。云底高的目测可根据经验估计,还可以结合气球进行测量,但这些都有较大误差。随着气象水文观测自动化的不断发展,很多云的自动探测识别仪器相继涌现。按工作平台不同主要分为

卫星遥感和地基遥感两种方式。卫星遥感测云仪器如甚高分辨率辐射计(AVHRR)、多光谱扫描仪(LANDSATMSS)、中分辨率成像光谱仪(MODIS)等。研究表明,卫星云图更适合揭示大范围地区的云气候特征,其代表地域广泛。但对低云和区域性云信息的描述可能不太理想^[2]。因此,地基遥感测云仪器的研究一直受到关注。

1 国内外全天空测云仪器现状

近年来,随着电荷耦合器件 CCD(charge-coupled device)等硬件技术的发展和数字图像处理技术的不断完善,很多地基遥感测云仪器研制成功,比如全天空成像仪 WSI(whole sky imager)、总天空成像仪 TSI(total sky imager)、红外测云仪 ICI(infrared cloud imager)等等。这些仪器中,有的已经可以获取全天空云图,有的只能获取部分天空图像,但总的目标是进行全天空云的自动化观测。下面根据测量技术分别进行讨论。

1.1 可见光波段测云仪器

可见光波段测云法直接采用照相机对天空进行拍摄,获取天空可见光亮度(辐射)分布,当天空某部分视野内有云时,天空亮度(辐射)减小,从而区分云和晴空。Bradbury等^[3]曾利用模拟式相机研究了

云的观测问题,指出利用这样的系统可以确定云底高度和云底的运动,并用于对卫星反演的云参数进行验证;十几年前,欧洲的 Gardiner 等采用鱼眼照相机拍摄照片来测量云量^[4];美国 Yankee 环境系统公司(YES)研制出了总天空成像仪 TSI^[5],其前身是半球天空成像仪 HIS(hemispheric sky imager)。它将 CCD 相机安装在顶部,向下对准底部有加热装置的曲面镜进行全天空镜像拍摄。新一代 TSI880 型采集的图像是分辨率为 352×288 的 24 位 JPEG 彩图,采样最短间隔 10 s,工作温度为 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。TSI 给出白天半球天空的连续图像(视张角为 160°),当太阳高度角大于 10° 时可以反演出天空云的分布。Girona 大学研制出了全天空相机 WSC(whole sky camera),其核心部件是加装鱼眼变焦透镜的商用彩色 CCD 镜头,可以得到分辨率为 768×576 的全天空图像(视张角为 160°),工作温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。位于西班牙南部城市格拉纳达的大气物理研究中心研制出全天空成像仪 ASI(all sky imager)^[6],该仪器采用的是全彩色 CCD 相机,外加鱼眼透镜,能获得视张角为 185° 的全天空图像。国内方面,霍娟等研究开发了地基全天空可见光成像观测系统^[7]。这类仪器无法获得夜间的云量信息,不利于实现云量的自动连续测量;白天受到大气能见度的影响,测量准确度难以保证。

1.2 双(多)波段测云仪器

双(多)波段测云法通过测量两个或多个窄波段辐射值的方法来确定天空是否有云,从而确定云量。美国加利福尼亚大学研制成功了一种全天空成像仪 WSI^[8]。其光学部分采用 512×512 分辨率的 16 位高质量的温控 CCD 相机,加装鱼镜头得到全天空图像(视张角为 180°)。另外还包括光谱过滤器、带加热设备的磨砂玻璃罩等装置。早期的全天空成像仪工作在中心波长为 450 nm 和 650 nm 的两个波段,分别是 70 nm 宽,后来增加了中心波长在 800 nm 的波段。WSI 根据太阳和月亮的位置,地月距离,以及照明条件(阳光、月光和星光)等天空条件采用相应的中性滤光片获取图像。在进行云识别时,白天和夜间采用了不同的算法,白天依靠可见光波段获取图像的红蓝对比阈值确定有云点。夜间则将测得的星场图像与计算的星象图作比较,确定哪些已知的明亮的星星被云遮盖,从而识别云。由于其采用的光学部件较为昂贵,工程设计又非常复杂,所以价格较高。

1.3 红外辐射测云仪器

红外辐射测云法通过测量云的红外辐射强度可以得到云的亮温,结合云的辐射率,可得到云的实际温度。红外辐射测云法主要有两种方式:一是单元式,另外一种为面阵列式。

单元式(单点或多点红外辐射计)测云仪器目前已有较成熟的产品。最初 Gaumet 等^[9]利用安置在一个二维活动支架上的辐射测温仪来测量云的红外辐射强度;后来 Genkova 等^[10]和 Besnard 等^[11]研制了红外云分析仪 CIR(cloud infrared radiometer)系列(前身称为 Nephelo),它工作在 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 波段,通过安装多个传感器来观测天空,用于提高测量的实时性。其中 CIR-7^[10]利用 7 个探头安置在一个半圆的环上,每个探头有 6° 的视张角,将全天空分成 181 个像元,通过扫描来测量全天空红外辐射。中国科学院大气物理研究所开展了单元式红外技术进行云量测量的研究。这种仪器能通过分析红外辐射数据得到总云量、分云量和云底高,但对薄卷云的识别有困难。同时,其机械动作多,天空云像素的空间分辨率较差,不利于对云状进行识别判断。要提高天空分辨率,则需增加扫描时间(单点)或增加红外辐射计探头。

面阵列式红外辐射测云采用的红外焦平面探测器空间、时间分辨率高,同时可实现昼夜的连续测量。美国蒙大拿州立大学 Shaw 等研究开发的红外云成像仪 ICI^[12-15],利用视场为 $18^{\circ} \times 13.5^{\circ}$,分辨率为 320×240 的非致冷红外面阵列相机对天空进行了成像探测,获得天空红外辐射分布从而判断云。目前 ICI 的镜头视场较窄,不能对全天空进行测量,无法得到总云量。Smith 等^[16]采用 FLIR 系统公司 Thermovision A40 型热红外成像仪进行天空辐射值测量,内置非致冷红外面阵列的分辨率为 320×240 ,工作在 $7.5\sim 13\text{ }\mu\text{m}$ 波段,加装 9 mm 镜头使其视场可以达到 $60^{\circ} \times 80^{\circ}$ 。目前其产品仍处在实验阶段。孙学金等^[17]进行了面阵列式云的测量研究,研制了全天空红外测云系统 WSIRCMS(Whole Sky Infrared Cloud Measuring System)。它利用 $8\sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 波段大气向下红外辐射反演云的信息,该系统由光学测量单元、环境参数测量单元、控制单元、电源、支撑结构、数据处理终端和通信电缆组成。光学测量单元也使用了一块 320×240 像元的非致冷红外焦平面阵列。工作时,在扫描伺服机构的控制下,按顺序分别得到天顶及天边 8 个方位的红外辐

射值信息,经过拼图^[18]、水汽修正和天顶角修正得到全天空红外辐射分布,从而进一步反演云族、云量和云分布信息。此类仪器的主要缺点是每次观测时都需进行定标,同时受环境影响大,保护措施要求高。

2 关键技术分析

2.1 全天空图像获取

获取全天空图像是进行全天空云的测量的前提。在目前已有的全天空测云仪器中,大部分采用 CCD 镜头进行全天空图像的获取,由于单块 CCD 镜头的视张角无法达到 180° ,研究人员采用了各种方法以获得全天空图像。归纳起来主要有 3 种:第 1 种是 CCD 镜头加装鱼眼透镜对天空进行拍摄获取,这类仪器主要有 WSI, ASI, WSC 等。这种方法的优点是一次拍摄便可获取全天空图像,但采用鱼眼透镜使得获取的全天空图像天边部分发生畸变,对于分析云量及以后有可能进行的全天空云分类产生影响。第 2 种是通过球面镜获取天空镜像后,用相机向下拍摄球面镜上的全天空图像获取,代表仪器是 TSI。这种方法的优点是镜头向下间接拍摄全天空图像,有利于保护镜头,但球面镜可能受外界环境影响造成影像的失真,在较暗的环境下不容易得到高质量的全天空图像^[19]。第 3 种方式是采用 CCD 镜头旋转扫描并拼图得到全天空图像, WSIRCMS 就是采用这种方法对八方位及天顶方向进行扫描,将得到的 9 幅辐射值图拼图获得全天空辐射值分布。此方法解决了采用大视场非致冷红外焦平面组件实现全天空红外辐射的定量测量问题,但由于采用扫描拼图技术,转动性能要求高,同时获得的全天空图像会有 1~2 个像元的拼缝存在。对于采用点扫描方式的仪器,诸如 CIR 系列的仪器,主要采用多探头快速扫描获取全天空辐射值分布,这种仪器对转动性能的要求更高。

2.2 镜头保护

光学器件若暴露在野外,易受灰尘、雨雪、露、霜的污染。因此,如何进行镜头保护减小测量误差就非常重要。比如,WSI 在设计之初采用的是半圆形浇铸树脂玻璃进行防护,但浇铸的树脂玻璃在周围部分容易产生光学畸变,且易累积露、霜。后来采用了高质量的平板磨砂玻璃,里面加装加热设备以防止结露结霜^[20]。WSC 的 CCD 镜头安装在两层保

护的罩子中,用来防止雨淋及其他环境污染,其中含有温控装置,用来保护镜头过热^[19]。WSIRCMS 采用主体为金属结构的密闭腔进行镜头防护,腔体上开有观测窗,镶有等离子金刚石镀膜的高强度透红外锗玻璃,密闭腔将非致冷红外焦平面阵列和内定标黑体与自然大气隔离。为了防止密闭腔内以及锗玻璃窗上结霜、结露和积尘等污染情况的发生,还采用了加热、吹风及干燥等相应的防护设计措施^[17]。另外需要注意的是,CCD 面阵列长期暴露在高光照强度下容易损坏。对于这一问题的处理,WSC 采用覆盖镜头视张角 180° 的整条具有一定宽度的遮挡条带,但不能自动遮光,只能采用手动进行(一般每周一次)^[19],这种方法较为原始。WSI 采用能东西方向滑动的遮光盘,通过软件控制在覆盖视张角 180° 的转动轨道上自动对太阳和月亮进行遮挡。也可以选择将转动轨道改进成较细的支撑柱,其长度可根据不同地区进行选择,有的需要视张角 180° 的遮光,有的只需要部分遮盖^[20]。ASI 采用的遮光方式与改进后的 WSI 的遮光方式较为类似,但采用的是类似机械手转动装置,可根据太阳位置的变化自动屈伸支撑臂以遮挡阳光^[6]。TSI 的遮光设计比较巧妙,它根据太阳方位角的变化,通过旋转机身并利用支架遮挡太阳^[19]。

2.3 云点识别

对于可见光波段的测云仪器,目前云点识别一般采用阈值判别法,即以红蓝波段的灰度值(或辐射亮度)对比作为云和晴空的判断依据。大气分子散射与波长 λ^{-4} 成正比,因此,晴空时蓝色散射较多(晴空呈蓝色)。可见光波段云的散射与波长的关系不明显,因此云体呈白色。Shields 等^[21]认为 WSI 图像可以采用固定的红蓝对比阈值进行不透明的云点识别,并不需要考虑天顶角的变化。薄云则根据实际图像的红蓝对比值(R/B)与预存的背景晴空红蓝对比值的比较进行判断,其中晴空红蓝对比值与天顶角、太阳所在位置有关。TSI 也是采用类似的方法进行云点识别。相对于 WSI,TSI 区分不透明云点、薄云和晴空 3 种情况,WSC 只区分云点和非云点。根据大量图像分析取红蓝对比值大于 0.6 的像元为云点,低于该值为非云点^[19]。Yamashita 等^[22]提出用天空指数(sky index)来表述获得的全天空图像,将此指数定义为 $(B-R)/(B+R)$ 。经统计研究,将指数大于 0.3 的像元判断为晴空,小于 0.2 的点为云点。众多实验表明,此类方法容易误

判天边和太阳附近的像元。其主要误差来自薄云和天空气溶胶的存在,为了解决这一问题,目前 WSI 正在研究近红外波段辐射值与红色波段辐射值之比,以进一步区分雾、霾天空和云点。作为红蓝阈值判别法的延伸, Souza-Echer 等^[23]在利用视张角为 72° 的测云仪器观测南极地区上空云量时,将 RGB 图像转换到 HIS 域,其中 H(hue)表示色调, I(intensity)表示亮度, S(saturation)表示饱和度。然后,计算图像 HIS 域的饱和度并作为云点识别的因子,采用平行六面体分类法进行云、晴空和不确定点 3 类像元的识别。与人工目测分析结果相比,此方法对晴空的估计偏高。Cazorla 等^[6]采用含有一个隐层的多层感知器网络对 ASI 获取的图像进行不透明的云点、薄云、晴空 3 种像元的识别。在实验时采用遗传算法将 18 个输入参数(R, G, B 值, 八临域的 R, G, B 均值, 八临域的 R, G, B 方差, 灰度值, 八临域灰度均值, 八临域灰度方差, $R/G, R/B, G/R, G/B, B/R, B/G$)简化为 3 个最有效的参数(八临域 R 均值, 八临域 B 均值和八临域 R 方差),这也从侧面证明了可见光图像进行云点识别的主要信息隐含在图像的 R 和 B 波段,此方法与采用红蓝对比阈值的效果类似。Linfoot 等^[24]研究了利用联合神经网络对 WSI 获取的白天图像进行云点识别的方法,首先采用自组织映射(SOM)降低原始图像的空间复杂性,而后采用混合专家网络进行云点识别,其识别结果与人工分析结果的一致性在 90% 以上。

对于采用红外辐射法的测云仪器,基本上采用辐射传输模式计算阈值的方法。CIR-7 根据实际得到的大气热力学状态廓线计算 PWV,进而采用 line-by-line 辐射传输模式计算出晴空阈值^[10]。为了对红外云成像仪(ICI)得到的辐射值图像进行云点识别, Shaw 等^[12, 25]研究提出一种考虑温度依赖关系的水汽修正方案,分别在地面气温 $+27^\circ\text{C}$, $+15^\circ\text{C}$, 0°C 和 -15°C 时拟合出积分辐射率与可降水量之间的关系式,并采用内插的方法确定其他地面气温时水汽辐射率修正项。Thurairajah 等^[26]在分析了 ICI 测量值与微脉冲激光雷达 MPL(micro-pulse lidar)和毫米波云雷达 MMCR(MM-wave cloud radar)数据后,提出了适合于 Alaska 的 $1.5\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 和 Oklahom 的 $2.65\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr})$ 的最佳阈值,并指出阈值可根据地面气象条件和气溶胶进行动态调整,以便既能识别出高的薄卷云,又不致于将霾和雾误识别为云。通过 WSI 和 MPL 测

量云量结果的比较,发现 ICI 与 MPL 的相关性和误差昼夜差异不明显,但 ICI 与 WSI 的相关性和误差昼夜差异明显,晚上相关性减小,误差增大。这也说明 WSI 昼夜云识别算法的不同有可能导致云量结果的不一致性。Smith 等^[16]提出了与 PWV 无关的随天顶角变化的天空亮温经验表达式,利用与天顶角和云透过率有关的阈值表达式区分云点和非云点。WSIRCMS 的云识别算法采用晴空红外阈值与纹理特征相结合的方法。确定了水汽含量(PWV)与晴空大气向下红外辐射值之间的统计关系式,并由此来确定云识别阈值。为解决阈值确定以及定标时存在误差导致高云的误识别问题,又提出了采用纹理法进行云辅助识别的方法。

2.4 云量计算

目前地基测云仪器得到的云量用下式进行计算:

$$f = \frac{N_{\text{cloudy}}}{N_{\text{total}}} = \frac{N_{\text{cloudy}}}{N_{\text{cloudy}} + N_{\text{clear}}} \quad (1)$$

式(1)中, N 表示云点或非云点的像元个数。

由于 WSI, ASI 的视张角为 180° 或超过 180° , 因此它们计算得到的 f 可以称之为总云量(total cloud cover)。WSC, TSI, ICI 和 WSIRCMS 的视张角都没有达到 180° , 一般称之为局部云量(fractional cloud cover)。Long 等^[19]认为利用鱼眼透镜或半球面镜得到的图像,不管其角度失真程度有多小、是否经过修正,天空中的云块与投影在云图上云块面积是有差异的。从这个意义上讲,为保证与人眼目测结果的一致性,半球天空云图进行云量统计时需要进一步修正为:

$$f = \frac{\sum l_i N_i^{\text{cloudy}}}{\sum l_i N_i^{\text{total}}} \quad (2)$$

式(2)中, l_i 为修正系数,与天顶角有关。

采用遮光板、遮光带的仪器会有部分云量无法统计。比如, TSI 有近 9.5%^[27], WSC 冬天有约 10%, 夏天约 15% 的区域无法得到具体云量^[19]。WSI 和 ASI 也有不同程度的遮挡。

2.5 云底高计算

目前常用的云底高 CBH(cloud base height)测量方法有上升气球测量法、云幕灯法和激光测云仪法。这些传统方法只能获得一个(或数个)测量点高度信息。如何获取大视场的云底高信息一直是很多气象学者感兴趣的课题。其中有人尝试采用双站数字摄像测量云底高^[28], 这种方法的主要原理是采用

两个方位不同的摄像机拍摄同一物体,利用该物体成像位置的差异来计算物距。为保证各种云高条件下的测量精度,全天空测量云底高的有效视野范围在视张角 100° 以内。但一直以来这种技术需要人工干预,并且视场较小、计算复杂。Seiz 等^[29] 成功利用两台宽视场摄像机进行云底高的测量,取得了较好的效果。Kassianov 等^[30] 利用两台 TSI 进行双基站测云高的原理分析和实验,并提出了新的算法,与激光脉冲雷达测量的结果对比显示此方法有效。

采用红外辐射法的测云仪器可以得到云底亮温并根据温度递减率估算云底高。章文星等^[31] 利用 Modtran4.0 模式比较系统地研究了不同强度(以地面能见度表示)和不同类型气溶胶情况下,晴空和各种云所形成的天空红外亮温 T_b 随地面观测天顶角的变化,从中发现利用 T_b 观测来遥感云底高度的可行性,以及由观测 T_b 和地表温、湿值反演云底高度的方法。从模式计算和试验的初步结果可以看出:对于低云和中云,地基观测的 T_b 对 CBH 的变化有相当的敏感性,因此可以用于云底高度的反演。仪器 CIR-7 根据实测大气状态廓线和云底亮温进行云底高度计算。通过与 Vaisala 的云幕仪(VCEIL)、主动遥感云雷达(ARSCL)测得的云高比较,认为采用中间的两个探头对 36° 视张角范围内测量得到的云底高较为可信^[10]。

2.6 云状识别

目前云状在业务上主要依靠人工目测。理想的云分类要考虑云的几何形态,云的形成、发展及演变物理过程,云体本身的宏观和微观物理性质以及与云有关的天气系统的性质等等。国际上云的分类主要以云的外形(亮度、色彩、延展及大小)以及高度特征作为基础,结合云的成因发展及内部微观结构,将云分为高、中、低 3 族 10 属 29 类。

地基云状识别分类受到仪器发展的限制,相关研究寥寥无几。Buch 等^[32] 对 WSI 云图进行了识别分类,主要考察了云图的纹理特征、位置信息和像元亮度信息,纹理特征选择采用了 LAWS 纹理分析法。运用二元决策树进行高积云、卷云、层云、积云和晴空等 5 种天空类型的判断,总正确率达到 61%。Peura 等^[33] 针对全天空成像仪提供的云图,主张采用云的基本物理信息分区域进行识别,试图区分 10 属云类。基本物理信息包括云体的轮廓清晰度、大小、纤维性程度和边缘信息,采用 K 均值聚类总正确率为 65%。Singh 等^[34] 利用数字相机得

到的图像进行地基云图识别分类研究,通过自相关法、灰度共生矩阵法、LAWS 能量法等方法提取出上百种云特征,进行区分积云、浓积云、积雨云、天空和其他云类这 5 种天空类型。但对于分类效果仅限于方法性的讨论,认为获取图像的质量和图像分割的质量会影响分类效果。Calbó 等^[35] 采用位于不同地区的 TSI 和 WSC 仪器的数据,通过抽取原始图像的统计信息、Fourier 变换图像的信息和有云无云点的信息进行晴空、波状云、卷云、层状云和积状云 5 类天空状况的识别,正确率达到 76%。孙学金等^[36] 研究了 WSIRCMS 获取的全天空图像云特征,提出了基于模糊纹理光谱结合云物理属性的全天空云类识别方法。对单一天空的层状云、积云、高积云、卷云和晴空的平均识别率达到 98%,具有很好的分类效果。

3 全天空测云仪器产品应用

在应用方面,全天空测云仪器需要首先分析其获取的产品与人工目测、卫星云图之间的差异。Besnard 等^[37] 比较过 Nephelo(CIR 系列的前身)与 TSI、人工目测云量的结果,认为有较好的对应关系。Feister 等^[38] 比较了 WSI 的云量与人工目测资料的差异,并且选择天顶的局部云量与 Vaisala 的 LD-40 云幕仪作比较。结果表明,WSI 测得的云量与人工目测资料总体相差约 1 Okta(云量的八分量表示),但比云幕仪获取的云量更加准确。云状和云底高方面的对比工作较少,尤其云状的自动判别有很大难度。从现有云的器测方法来看,要达到 3 族 10 属 29 类云状的完全判别是难以实现的。业务中云的观测项目和分类是从人工目测方便性和人工目测可操作性来进行定义的,并不适用于云的器测实施。而且,仪器的观测能力有限,比如云体本身的宏观和微观物理性质难以获取,云的形成、发展及演变物理过程难以重现。同时,云本身是复杂变化的,对于一个具有相当水平的观测员来说,识别出规范规定的 29 类云也是有难度的。因此,提出适合仪器观测的云分类原则是进行自动识别云状的前提。

当然,也可以利用测云仪器获取的全天空云分布信息和辐射值分布信息进行科学实验,比如 Besnard 等^[39] 认为 CIR 系列测云仪器的数据可以进行 UVB 的研究分析。Sabburg 等^[27] 利用 TSI 和紫外辐射计研究了云对到达地面的太阳紫外辐射的影

响。Pfister等^[40]利用可见光波段的全天空测云仪研究了云量与太阳辐射的关系。Smith等^[41]利用热红外成像仪进行云的辐射强迫研究。Musat等^[42]利用WSI进行夜间大气光学厚度的估计,Olmo等^[43]利用ASI对白天气溶胶和云的光学厚度进行研究,并与其他方法得到的光学厚度比较,认为有很好的对应关系。Martins等^[44]曾对卫星云量资料与全天空云资料应用于辐射传输模式计算地面天空辐射进行比较研究,指出利用全天空成像获得的云量资料会低估天空辐射值25%~32%,而利用卫星资料后与实测辐射值的偏差只有3%~7%,原因可能是卫星云量资料包含了云光学厚度信息等等。随着全天空测云仪器安装使用时间的增长,其长时间的局地数据可以进行云的时空变化规律研究,云对局地气候变化的影响,云与温度、湿度、地形等关系的研究等,具有广阔的应用前景。

4 小 结

分析全天空测云仪器和技术现状发现,可见光波段测云仪器最大的缺点是无法进行夜间观测,这就使其难以担当业务化应用的重任。WSI尽管采用了多波段以进行夜间观测,但由于昼夜算法的差异,其数据的一致性无法令人满意。单元式红外测云仪器由于分辨率的问题,在云状识别方面将很难开展。采用面阵列式红外辐射测云可以解决夜间观测,分辨率也能达到要求,但技术难度大,稳定性有待进一步考验。目前看来,全天空云量、云分布的自动观测技术基本成熟,全天空云高的自动化观测需要进一步研究,云状自动识别仍有较多困难。因此,全天空测云仪器在业务化应用之前仍有很多工作要做,主要有以下几个方面:

1) 各种测云仪器的稳定性、环境适应性需要进一步提高。文中提到的各种仪器优缺点并存,仪器能否满足长时间稳定的野外观测仍需进一步验证。此外,由于这类仪器大多设计精细复杂,维修维护需要专业技术人员进行。因此,可靠、稳定的运行是此类仪器业务化应用的首要前提,否则业务化应用后将加重基层台站负担。

2) 云量测量准确性和代表性需要深入研究。云的三要素观测中,目前只有云量可以相对准确地进行自动观测,但也存在一些问题。比如文中所述测云仪器中,普遍存在对天边云判断错误率高的问

题,这与光学路径长、低空大气温度和水汽的叠加效应有不可分割的联系,如何解决这一问题需要进行深入的科学实验。另外,可否考虑将仪器观测云量定义到一定的天顶角以上区域,多大天顶角具有代表性,与人工目测云量的对应关系,能否保证资料的连续性等等,都需要在仪器业务化之前进行研究讨论。

3) 全天空云底高度测量技术需要进一步实验研究。全天空云高的自动化观测可以借助于单点主动式测云高修正方法,或者采用双站式测云仪器重叠区域进行研究。对于红外测云仪器来说,还可以根据云底亮温结合温度递减率、地面气象要素以及水汽含量估算^[45]。

4) 器测云状识别标准或约定应尽快研究讨论,云状识别技术需要进一步研究。云状的自动识别由于缺乏器测云分类标准的指导,提高分类精度的难度较大。需要尽快建立器测云分类标准指导和促进云的自动化观测。从现有的云探测资料的手段来看,将云分为3族10属29类也是没有必要的。随着测云手段的多样化,进一步加深对云的认知,对于云的观测可以不再依赖地面观测云类的多少。另外,目前利用气象卫星云图进行云状的判别也基本分为积雨云、层积云、中高云、卷云等具有天气意义的几类^[46-53]。云的国际电码规定在气象报告中采用 C_L, C_M, C_H 3组云天电码来表达当时的天空状况和特点^[1],其中 C_L 包括层积云、层云、积云和积雨云4个云属, C_M 指高积云、高层云和雨层云3个云属, C_H 是卷云、卷积云和卷层云3个云属。这可以认为是将云天当作一个整体来看待,选择具有典型的天气指示性意义的云天电码表示当时天空类型。可以考虑根据这一原则建立器测云分类标准,从可行和实用两个角度,结合形态学对云观测的要求,从图像上对云进行分类。同时,将多种手段进行综合判别,结合雷达资料、卫星资料、雷电资料、地面气象观测资料、高空气象探测资料,得到具有天气学意义的器测云分类标准。

参 考 文 献

- [1] 林晔. 大气探测学教程. 北京: 气象出版社, 1993.
- [2] 翁笃鸣, 韩爱梅. 我国卫星总云量与地面总云量分布的对比分析. 应用气象学报, 1998, 9(1):32-37.
- [3] Bradbury D L, Fujita T. Computation of Height and Velocity of Clouds from Dual, Whole-sky, Time-lapse Picture Sequences. Satellite and Mesometeorology Research Project

- (SMRP), 1968.
- [4] Gardiner B G, Kirschs P J. Setting Standards for European Ultraviolet Spectroradiometers. EC Air Pollution Report No. 53, Commission of European Communities, Luxembourg, 1995:138.
- [5] Long C N, Slater D W, Tooman T. Total Sky Imager Model 880 Status and Testing Results. ARM Technical Report ARM TR-006, U S Department of Energy, Washington DC, 2001.
- [6] Cazorla A, Olmo F J, Alados-Arboledas L. Development of a sky imager for cloud cover assessment. *J Opt Soc Am A*, 2008, 25(1):29-39.
- [7] 霍娟, 吕达仁. 全天空数字相机观测云量的初步研究. 南京气象学院学报, 2002, 25(2):242-246.
- [8] Shields J E, Karr M E, Tooman T P, et al. The Whole Sky imager—A Year of Progress. Eighth Atmospheric Radiation Measurement (ARM) Science Team Meeting, Tucson, Arizona, 1998.
- [9] Gaumet J L, Renoux N. Cloud Cover Observations Using an IR Sensor. 10th Symp on Meteorological Observations and instrumentation, Phoenix, AZ, 1998:161-164.
- [10] Genkova I, Long C N, Besnard T, et al. Assessing Cloud Spatial and Vertical Distribution with Infrared Cloud Radiometer CIR-7//Proceedings of SPIE. 2004, 4482:341-349.
- [11] Besnard T, Gillotay D, Berger L. Ground Based Sky Dome Pictures Generated By Infrared Spectrometric Data// Proceedings of SMOI Conference. Long Beach, CA, USA, 2003.
- [12] Shaw J A, Thurairajah B. Short-Term Arctic Cloud Statistics at NSA from the Infrared Cloud Imager//Proceedings of the Thirteenth ARM Science Team Meeting, Broomfield, CO, 2003.
- [13] Shaw J A, Thurairajah B, Edqvist E, et al. Infrared Cloud Imager Deployment at the North Slope of Alaska During Early 2002. 12th ARM Science Team Meeting, Washington, D C, 2002.
- [14] Thurairajah B, Shaw J A. Infrared Cloud Imager Measurements of Cloud Statistics from the 2003 Cloudiness Intercomparison Campaign//Proceedings of the Fourteenth ARM Science Team Meeting, Albuquerque, New Mexico, 2004.
- [15] Thurairajah B. Thermal Infrared Imaging of the Atmosphere: The Infrared Cloud Imager. Elect Comput Eng Dept, Montana State Univ, Bozeman, 2004.
- [16] Smith S, Toumi R. Measuring cloud cover and brightness temperature with a ground-based thermal infrared camera. *J Appl Meteorol Climatol*, 2008, 47(2):683-693.
- [17] 孙学金, 高太长, 翟东力, 等. 基于非制冷红外焦平面阵列的全天空红外测云系统. 红外与激光工程, 2008, 37(5):761-764.
- [18] 孙晓钢, 孙学金, 牛珍聪, 等. 全天空云图获取的一种方式及算法实现. 气象科学, 2008, 28(3):338-341.
- [19] Long C N, Sabburg J M, Calbo J, et al. Retrieving cloud characteristics from ground-based daytime color all-sky images. *J Atmos Ocean Technol*, 2006, 23(5):633-652.
- [20] Tooman T P. Whole Sky Imager Retrieval Guide. ARM TR-011.1, 2003.
- [21] Shields J E, Johnson R W, Karr M E, et al. Daylight Visible/NIR Whole-sky Imagers for Cloud and Radiance Monitoring in Support of UV Research Programs // Proc SPIE. 2003, 5156:155-166.
- [22] Yamashita M, Yoshimura M, Nakashizuka T. Cloud Cover Estimation Using Multitemporal Hemisphere Imageries // Proc 7th Congress of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS04). Istanbul Turkey, 2004:818-821.
- [23] Souza-Echer M P, Pereir A E B, Bins L S, et al. A simple method for the assessment of the cloud cover state in high-latitude regions by a ground-based digital camera. *J Atmos Ocean Technol*, 2006, 23(3):437-447.
- [24] Linfoot A, Alliss R J. A Cloud Detection Algorithm Applied to a Whole Sky Imager Instrument Using Neural Networks// 19th Conference on Probability and Statistics Sixth Conference on Artificial Intelligence Applications to Environmental Science. New Orleans, LA, 2008.
- [25] Shaw J A, Thurairajah B. Statistics of Alaskan clouds from the infrared cloud imager (ICI) // Proc SPIE Conf Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research. San Diego, CA, 2003:1-6.
- [26] Thurairajah B, Shaw J A. Cloud statistics measured with the infrared cloud imager (ICI). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(9):2000-2007.
- [27] Sabburg J M, Long C N. Improved sky imaging for studies of enhanced UV irradiance. *Atmos Chem Phys Discuss*, 2004, 4:6213-6238.
- [28] 谭涌波, 陶善昌, 吕伟涛, 等. 双站数字摄像测量云高. 应用气象学报, 2005, 16(5):629-637.
- [29] Seiz G, Baltsavias E P, Gruen A. Cloud mapping from the ground: Use of photogrammetric methods. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2002, 68(9):941-951.
- [30] Kassianov E, Long C N, Christy J. Cloud-base-height estimation from paired ground-based hemispherical observations. *J Applied Meteor*, 2005, 44(8):1221-1233.
- [31] 章文星, 吕达仁, 常有礼. 地基热红外亮温遥感云底高度可行性的模拟研究. 地球物理学报, 2007, 50(2):354-363.
- [32] Buch J K A, Sun C H. Cloud Classification Using Whole-sky Imager Data. 9th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation, Charlotte, North Carolina, 1995:353-358.
- [33] Peura M, Visa A, Kostamo P. A New Approach to Land-based Cloud Classification//Proceedings of the Thirteenth International Conference on Pattern Recognition (ICPR'96). Vienna, Austria, 1996, 4:143-147.

- [34] Singh M, Glennen M. Automated ground-based cloud recognition. *Pattern Anal Appl*, 2005, 8(3):258-271.
- [35] Calbo J, Sabburg J. Feature extraction from whole-sky ground-based images for cloud-type recognition. *J Atmos Ocean Technol*, 2008, 25(1):3-14.
- [36] 孙学金, 刘磊, 高太长, 等. 基于模糊纹理光谱的全天空红外图像云分类. *应用气象学报*, 2009, 20(2):157-163.
- [37] Besnard T, Gillotay D, Zanghi F, et al. Intercomparison of Ground Based Methods for Determination of Tropospheric Cloud Based and Cloud Cover Amplitude // Proceedings of 11th Conference on Atmospheric Radiation. Ogden, UT, USA, 2002.
- [38] Feister U, Shields J. Cloud and radiance measurements with the VIS/NIR daylight whole sky imager at Lindenberg (Germany). *Meteorologische Zeitschrift*, 2005, 14(5):627-639.
- [39] Besnard T, Gillotay D, Zanghi F, et al. Operational Use of Infrared Cloud Analysers in Automatic Observing Networks and for Aeronautic Applications // Proceedings of IIPS Conference. Long Beach, CA, USA, 2003.
- [40] Pfister G, McKenzie R L, Liley J B, et al. Cloud coverage based on all-sky imaging and its impact on surface solar irradiance. *J Appl Meteor*, 2003, 42:1421-1434.
- [41] Smith S, Toumi R. Direct observation of cloud forcing by ground-based thermal imaging. *Geophys Res Lett*, 2008, 35(7).
- [42] Musat I C, Ellingson R G. The Use of the ARM WSI to Estimate the Atmospheric Optical Depth at Night. ARM Science Team Meeting, San Antonio, TX, 2001.
- [43] Olmo F J, Cazorla A, Alados-Arboledas L, et al. Retrieval of the optical depth using an all-sky CCD camera. *Appl Optics*, 2008, 47(34):182-189.
- [44] Martins F R, Souza M P, Pereira E B. Comparative study of satellite and ground techniques for cloud cover determination. *Adv Space Res*, 2003, 32(11):2275-2280.
- [45] Riordan D, Clay R, Maghrabi A, et al. Cloud base temperature measurements using a simple longwave infrared cloud detection system. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2005, 110(D3).
- [46] Shenk W E, Holub R J. A multispectral cloud type identification method developed for tropical ocean areas with Nimbus-3 MRIR measurements. *Mon Weather Rev*, 1976, 104(3):284-291.
- [47] Lamei N, Hutchison K D, Crawford M M, et al. Cloud-type discrimination via multispectral textural analysis. *Opt Eng*, 1994, 33(4):1303-1313.
- [48] 傅德胜, 王新芝. 云图纹理特征的抽取与云的自动分类. *南京气象学院学报*, 1995, 18(4):530-535.
- [49] Ohanian P P, Dubes R C. Performance evaluation of four classes of texture features. *Pattern Recognition*, 1992, 25(8):819-833.
- [50] Lee J, Weger R C, Sengupta S K, et al. A neural network approach to cloud classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(5):846-855.
- [51] Bankert R L. Cloud classification of AVHRR imagery in maritime regions using a probabilistic neural-network. *J Appl Meteor*, 1994, 33(8):909-918.
- [52] 师春香, 翟建华. 用神经网络方法对 NOAA-AVHRR 资料进行云客观分类. *气象学报*, 2002, 60(2):250-256.
- [53] 吴咏明, 张韧. 多光谱卫星图象的一种模糊聚类方法. *热带气象学报*, 2004, 20(6):689-696.

The Actuality and Progress of Whole Sky Cloud Sounding Techniques

Gao Taichang¹⁾ Liu Lei¹⁾ Zhao Shijun¹⁾ Sun Xuejin¹⁾²⁾ Liu Jian³⁾

¹⁾ (*Institute of Meteorology, PLA University of Science & Technology, Nanjing 211101*)

²⁾ (*School of Physics, Peking University, Beijing 100871*) ³⁾ (*68028 Troops of PLA, Lanzhou 730058*)

Abstract

Clouds are regular and important weather phenomenon which play important role on the earth's radiation budget and climate change. The shape, size, distribution and movement of them indicate the condition of the atmosphere, thus cloud observation is important. Clouds can be observed by means of both satellites and ground-based instruments. Satellite cloud images provide global coverage data which are used widely in weather forecast. Ground-based cloud images are very local ones which contain more details. Ground-based cloud sounding instruments have not been put into actual operations by far though. Some cloud base height measurements such as ceilometers and the newer laser beam ceilometers are developed in order to determine local cloud base height, however cloud coverage and typology are still determined with a subjective aspect by human observers.

In recent years, a number of ground-based sky imagers have been developed due to the improvements in both hardware and digital image processing techniques. Many well-known instruments are developed and used for cloud coverage estimation and scientific experiments. For example, the all sky imager (ASI), total sky imager (TSI) and whole sky camera (WSC) measure visible skylight from the entire sky dome during daytime, while the whole sky imager (WSI) provides hemispherical coverage with different detection techniques during day and night. The WSI has approximately 70-nm wide imaging bands centered at 450, 650 nm and 800 nm, identifying clouds from red/blue ratios during the day and from star maps at night (with gaps in operation near sunrise and sunset). The infrared cloud imager (ICI) and the Whole Sky Infrared Cloud Measuring System (WSIRCMS) are ground-based passive sensors that measures downwelling atmospheric radiance in the 8—14 μm wavelength band. These two instruments can identify clouds and calculate cloud amount continuously with accordant sensitivity during day and night. Some key techniques are analyzed, such as obtaining whole sky images, camera lens protection, cloud detection, cloud coverage calculation, cloud base height calculation and cloud type classification etc. It shows that, visible light based apparatus can hardly be applied in actual operation because they can't work well during night. The WSI can provide data at night, but the consistency can't turn up trumps because of the algorithmic difference during day and night. Images from cloud infrared radiometers have bad spatial resolution which goes against cloud classification. Sensors using infrared detector array can work with no difference in sensitivity during day and night and have good spatial resolution, but needs improving in stability. Fully considering whole sky cloud sounding theories, techniques and applications, there are still a lot of problems before these instruments to be used in actual operations. Their performance should be more firmness. The whole sky cloud base height should be lucubrated. The instrumental cloud form classification principle should be proposed to classify cloud with ground-based instruments.

Key words: cloud; whole sky; cloud sounding techniques