

物理-统计反演和云-晴空辐射特征差异检测结合的全天空高云判别能力改进算法与初步试验^{*}

李 宇^{1,2} 吕达仁² 霍 娟² 章文星²

LI Yu^{1,2} Lü Daren² HOU Juan² ZHANG Wenxing²

1. 成都信息工程学院, 四川成都, 610225

2. 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京, 100029

1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China

2. Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2012-01-28 收稿, 2012-07-30 改回.

李宇, 吕达仁, 霍娟, 章文星. 2013. 物理-统计反演和云-晴空辐射特征差异检测结合的全天空高云判别能力改进算法与初步试验. 气象学报, 71(1): 134-145

Li Yu, Lü Daren, Huo Juan, Zhang Wenxing. 2013. Improving the method for high cloud discriminability of All-Sky-Imagers based on physical-statistical relationship and radiation characteristics between cloudy and clear sky and its preliminary experiments. Acta Meteorologica Sinica , 71(1): 134-145

Abstract The threshold method is commonly used to determine cloud in sky, which has great limit when it comes to thin cirrus. This paper is focused on improving the ability of distinguishing high or thin cloud from sky. Based on the developed cloud detection by all-sky infrared and visible imagers, a new modified method is presented. Measurements of sky visible image and thermal infrared brightness temperature were conducted at the top of the laboratory building, using an automatic visible all-sky imager (ASI) and an automatic scanning infrared thermometer(SIRIS) developed by the Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), the Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences. The characteristics of pixels which are symmetrically disposed by the solar principal plane are used to estimate the existence of cloud in a visible image. As for SIRIS, the heteropic distribution of brightness temperature (TB) from the same elevation and the different azimuth can tell whether there is cloud. The cases at Beijing during the period January to March 2011, in which clouds do exist yet cannot be detected before are sorted to test the algorithm. The result shows that the ability of distinguishing high cirrus for ASI has reached to 73.9% and for SIRIS has reached to 70.1%. This work provides a new composite algorithm for the high cloud recognition.

Key words Ground-based cloud observation, Cloud imager, High and thin cloud, Sky radiation

摘要 在全天空红外-可见光云像观测反演方法基础上, 针对已往阈值法判断高云的局限性, 提出改进的算法。对可见光图像可利用以太阳-天顶为连线的主平面两边相元特性的对称性来判断云的存在, 对红外成像仪可利用同一仰角扫描时所得不同方位角亮温分布的非均匀性来判断云的存在。以北京 2011 年 1—3 月观测资料为基础, 选择原阈值法未能判别出来的案例进行再处理, 全天空可见光成像观测仪高云判别能力最高可达 73.9%, 全天空扫描式红外成像仪可达 70.1%。该工作为天空的高云识别提供新的复合算法。

* 资助课题: 国家公益性气象行业专项(GYHY200806031)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05040300)。

作者简介: 李宇, 主要从事地基遥感研究。E-mail: yu.li.carp@gmail.com

通信作者: 吕达仁, 主要从事大气与地球环境遥感, 大气辐射传输、中层大气与日地物理、生态与气候相互作用的探测与理论模式等方面研究。E-mail: ludr@mail.iap.ac.cn

关键词 地基云观测,云像仪,高薄云,天空辐射

中图法分类号 P412.15

1 引 言

云的宏观结构和微观属性影响地-气系统对太阳辐射的吸收、散射以及地-气系统中的长波辐射。IPCC(2007)指出,云是天气系统特征的主要表征和影响气候变化及其趋势中公认的最大不确定因素。云的地基观测已持续一个世纪以上(McGuffie, et al, 1989)。在 20 世纪的绝大多数时间,气象站对云的宏观观测绝大部分依赖气象员的主观肉眼观测(中国气象局,1997)。随着对观测信息内容需求的扩展及对所观测云量的客观定量要求的提高,规范由相应技术系统支持的自动化观测已成为必然趋势,并已在世界各国获得了多方面程度不同的进展(Long, et al, 2001; 霍娟等, 2006a; Mallama, et al, 2002; 章文星等, 2007)。与此同时,气象卫星的云观测越来越成为监测全球云及其变化的主要手段。地基遥感与卫星遥感探测其原理及观测位置不同,两者相互配合测量气象要素的优点显而易见,这正是当前空-地基联合云观测的研究应用方向。相对卫星探测方式,地基云观测更适合揭示区域性云特征和包括日变化在内的长期趋势变化。目前对云量、云状的识别仍以人工为主,其观测频次低、主观性强且难以全面详实描述实际云场及其分布情况。因此,地基云自动化观测正成为需要迫切实现的问题,并已成为中国地基气象观测自动化过程的关键环节之一。

当前中外地基云自动化观测的基本设备大致分两类,即可见光全天空云像仪和热红外全天空扫描云像仪,其基本原理分别是利用无云大气与云块的散射和热辐射特征的差异来识别云。可见光云像仪利用太阳光对无云大气和云块散射特性的光谱差别,主要是采用蓝红辐亮度比值的不同来判断云与晴空。因此,可见光云像仪判断云的能力就在于是否能针对当时天空状况与散射基本规律选择合适的蓝红比阈值。在热红外波段,由于云块的红外比辐射率高于晴空大气,在许多情况下云块相对地表而言,其向下热辐射接近于黑体在云底温度的向下辐射。因此,有云方向的红外辐射(用亮温表征)会高

于相同仰角方向晴空的亮温。天空向下的红外热辐射包含着(如有)云层与云下晴空大气(其中,水汽是红外辐射体,其辐射值大小与水汽所在高度当时的气温有关)的向下辐射贡献。由于实际天空中温度水汽分布是变化的,当前的热红外云像仪测云的实际定量反演是利用地表温度、水汽与大气垂直温度的分布有较好相关这一经验事实,以地区历史探空资料建立实测红外亮温、地表温度、湿度与可能的云、云底高间的物理统计反演关系,从而获得全天空云与晴空分布的反演结果。有关这一方面的理论工作与实验结果,可以参考相关文献(霍娟等,2006b; Huo, et al, 2009; 章文星等, 2007, 2010; Feister, et al, 2010a)。

从以上的原理与方法表述可以推测,无论可见光还是热红外云像仪,对云的判别都不可能绝对准确,还受制于云的自身特性和云下大气状况。云按云底高度可分为低、中、高三族。高云一般而言具有较小的云粒子浓度和较小的总光学厚度,但对于云的辐射气候作用而言,高云有别于中、低云,对云以下大气层和地表有加热作用;近地霾与低云对云以上大气层没有加热作用,对地表有降温作用。

可见光云像仪在判别高薄云时往往易受地面能见度(或霾层)的影响。能见度低时,由于气溶胶的增加造成天空色度的蓝色成分消弱,天空变得灰白,从而易将气溶胶大气误判为有云(Pfister, et al, 2003)。Shields 等(2003)认为,用阈值法测高薄云,首先需要根据天顶角、太阳位置预存背景晴空的红蓝比值,然后用实际情况比对该红蓝比值。云识别辐射比的最优蓝红比阈值为 1.3,大于 1.3 则为天空,小于 1.3 则判断为云(霍娟等,2006a),然而这需要已知大气能见度和天空气溶胶的定量信息。即使如此,对光学厚度较薄的云层也并不适用(Pfister, et al, 2003; 霍娟等, 2006a)。完全循此途径来识别高薄云会有很大的不确定性。

热红外探测高薄云也存在一定局限性,若云层高且光学厚度小,晴空和云之间的红外亮温差异将很小,要检测到这种差异需要一个高灵敏的接收器(Bozzo, et al, 2010)。由于不同天顶角的天空辐射

(亮温)是大气温、湿度廓线和天顶角的函数,且受近地层气溶胶和能见度的影响很大(章文星等,2007),本研究组以物理-统计反演法和红外辐射传输算法为基础,以历史探空资料为输入值,分别初步建立了适用于北京地区晴空和不同中低云云高的地面温度、水汽与观测亮温(TB)的统计关系,并基于此统计关系,确定一个亮温动态阈值来判断观测方向上是否有云(章文星等,2010)。无法用地表温、湿度完全确定当时天空不同仰角的晴空红外亮温,而只是给出一个最可几均值。因此,对高薄云而言,由于物理-统计反演法本身的不确定性,热红外云相元判别仍是一个瓶颈。

已有研究的对比表明,在对低云和中云进行识别时,地基全天空可见光成像观测系统(Digital Sky/All-sky Imager, ASI)与全天空红外扫描成像系统(Digital Sky/Scan IR Imager System, SIRIS)有很好的一致性,与同时有训练的气象员目测记录比较也有很高的一致性。而对高薄云识别,两者都表现出一定的局限性,在一些目测有薄高云的情况下,二者均不能很好地自动识别(Souza-Echer, et al, 2006; 章文星等,2010)。这是当前国际上共同面临的难题。

本文旨在已有的可见光与红外云像识别方法的基础上,增加新的识别方法,提高高云识别精度。

2 数据说明

全天空可见光成像观测系统能自动观测并获得高时间分辨率的天空可见光图像,提供云量观测和大气状况信息(霍娟等,2006a)。全天空红外扫描成像系统能进行全天空红外辐射亮温扫描成像的自动观测,实时提供全天空红外大气状况信息图像(章文星等,2007)。这两台仪器已在北京南苑、中国科学院大气物理研究所实验楼楼顶、河北香河、西藏羊八井、广东阳江等地实现同步观测,并已有相当的数据积累。

为试验本方法,选择中国科学院大气物理研究所实验楼楼顶(39.98°N, 116.38°E)2011年1—3月全天空可见光成像观测系统与全天空红外扫描成像系统同时观测的案例,按照仪器判别天空中高薄云的情况,主要分为3类:(1)目测有云,全天空可见光成像观测系统经红蓝比值法判断有云、全天空红外扫描成像系统经亮温阈值判断无云;(2)目测有云、全天空可见光成像观测系统判断无云、全天空红外

扫描成像系统判断无云;(3)目测无云、全天空可见光成像观测系统判断无云、全天空红外扫描成像系统亦判断无云,即晴空数据。

在本实验中,全天空可见光成像观测系统与全天空红外扫描成像系统在同一地点相距约5 m。全天空红外扫描成像系统每隔15 min观测一次,进行全天空扫描观测时将仰角分为40档,从地平(仰角0°)起,间隔2.25°直至天顶(90°)。方位角则随仰角抬升按2.28°—90°不等间隔扫描,完成一次全天空扫描需要约4.5 min,共采样4023个点。全天空可见光成像观测系统间隔3 min拍摄1次,每张图像为4288×2848像元。全天空红外扫描成像系统图像像元空间分辨率低于全天空可见光成像观测系统。在所分3类云况数据中分别挑选出10组时间相近的对比数据,即选取一张红外图像时,选取两张拍摄于全天空红外扫描成像系统扫描时间内的可见光图像用于比对。

全天空红外扫描成像系统和全天空可见光成像观测系统两者时间分辨率和空间分辨率不同,由于红外扫描仪的时空分辨率低,给数据匹配带来困难。然而在大气状况相对稳定、云场变化较慢的情况下,两者可以配合使用,并且,这将可能为未来云状识别带来更多的信息。随着热红外成像传感器性能改进和价格降低,气象业务可接受的热红外全天空快速成像观测即将实现。

3 原理与方法

3.1 现有反演云方法的成效与局限性

3.1.1 现有可见光反演云方法

现有可见光反演方法都是根据在可见光云像仪所获取的天空图像中蓝红辐射比值的大小来判别云或晴空,其关键是选择一个阈值,据此判别云或晴空。但比值的选择是一个复杂的问题,因为比值随天空方向与太阳的相对位置、太阳高度角(与地方时有关)以及地面能见度而变化。已有的工作(霍娟等,2006b; Huo, et al, 2009)已对此作了多方面努力,并已在低云和中云以及较厚的高云判别方面取得显著成效。但当比值处于阈值附近时就有可能出现对高云的误判,特别是对薄高云易于出现漏判,而此时若用人工判别,无论是直接目测天空或从已拍摄到的全天空图像来作人工判别,都可以确定薄高卷云的存在。用自动阈值选取来判别难以完全避免

漏判,这是统一阈值选取方法固有的局限性。而如改变阈值又可能出现将晴空误判为有云的错误。这里举 2011 年 2 月 19 日 12 时 30 和 33 分(北京时,下同)连续两次天空图像判别的差异来说明。图 1a、2a 为间隔 3 min 拍摄的可见光图像,其中都有一块卷云存在(红色框内)。然而,由于阈值法本身的局限性,使得判出的结果有很大差异,图 1b 判断出来有卷云,而图 2b 则没有(图中蓝色表示天空无云,

白色表示天空有云)。应该指出,这是所有采用这一方法时都有的局限。霍娟等(2006b)用 Libradtran 辐射传输模式来模拟晴空与有云大气辐射分布,结果表明,接近地平线的天空大气其散射辐射比与云的特征较为接近,此时识别云与晴空已有难度,因而全天空可见光成像观测系统观测统计一般都限于天顶角小于 80° 的天空。本文处理的数据均为太阳高度角大于 20° 的数据。

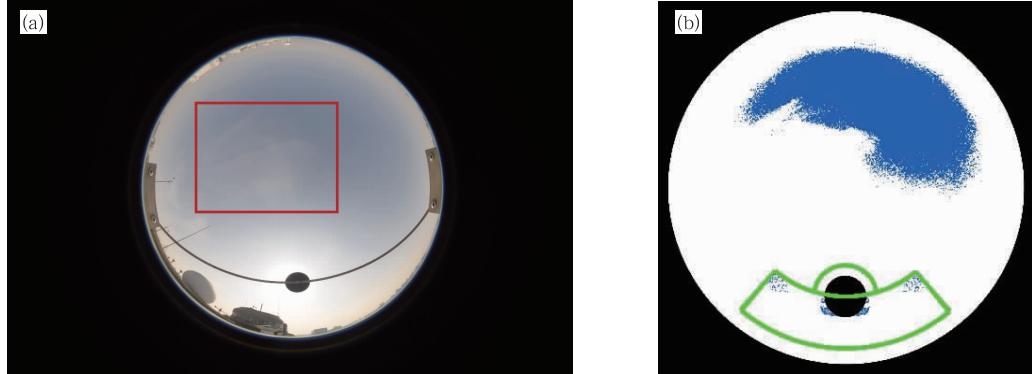


图 1 2011 年 2 月 19 日 12 时 30 分中国科学院大气物理研究所实验楼楼顶获取的天空有卷云图像
(a. 可见光图像, b. 经过比值法判断云点之后的图像)

Fig. 1 (a) Visible all-sky image at 12:30 BT 19 February 2011 at Beijing (at the top of the Laboratory Building of IAP) under the sky conditions dominated by cirrus. (b) The processed image derived from the threshold method, where white represents cloud and blue represents cloudless

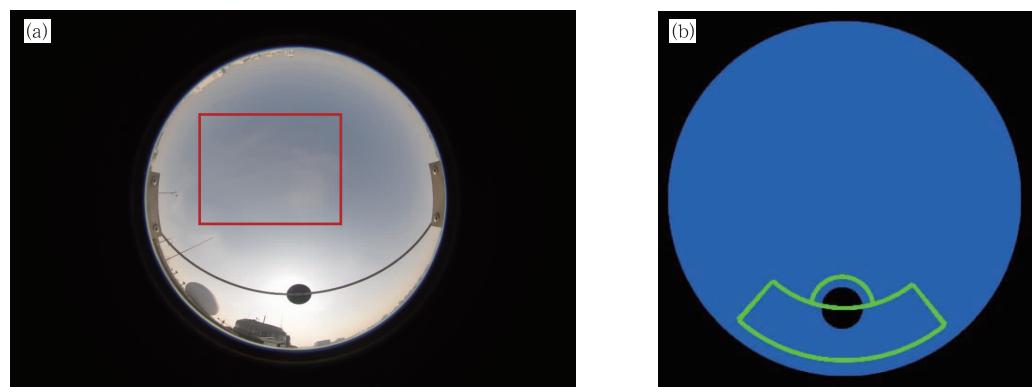


图 2 2011 年 2 月 19 日 12 时 33 分中国科学院大气物理研究所实验楼楼顶获取的天空有卷云图像
(a. 可见光图像, b. 经过比值法判断云点之后的图像)

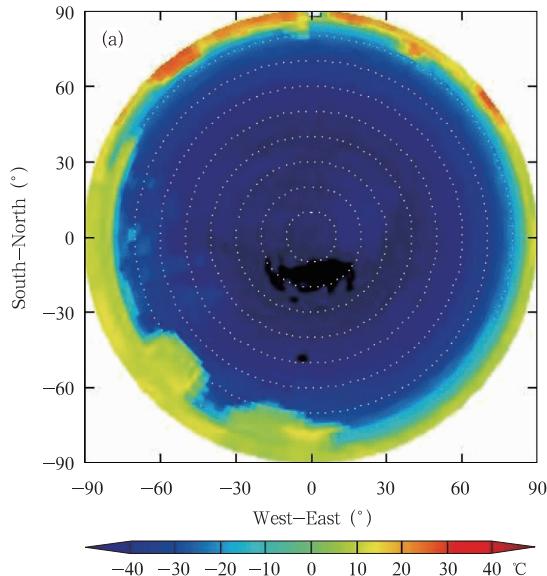
Fig. 2 (a) Visible all-sky image at 12:33 BT 19 February 2011 at Beijing (at the top of the Laboratory Building of IAP) under the sky conditions dominated by cirrus.
(b) The processed image derived from the threshold method

3.1.2 现有红外反演云方法

红外反演云方法一般采用物理-统计法(章文星等,2007)。以地表温度、水汽观测值通过该地区探空计算所得不同方向上的晴空红外辐射值建立晴空辐射值(亮温)与地表温湿度观测值的统计关系,再

用模式计算不同高度云在不同温、湿度分布下的红外亮温值来建立云底高度、地表温湿度参数的物理统计关系。由此建立的反演方法对中云、低云的判别具有较大的准确度,这是因为中低云的存在大大增加了云所在方向上的红外亮温,从而几乎不会产

生误判。当然对云底高度的判断由于实际云的非黑体性,易有高估的偏向。但是,对薄高云而言,由于其红外贡献可能不明显,处于物理-统计关系反演方法的误差之内,从而会产生漏判的情况。由于实际观测时不可能获得真正的大气层温、湿度廓线,此局限性从统计而言也几乎是不可避免的。这里也举 2011 年 2 月 19 日与 3.1.1 节所给同时刻的图像为



例来说明。与图 1、图 2 同组的全天空红外扫描成像系统亮温图像(全天空可见光成像观测系统与全天空红外扫描成像系统观测时间接近)如图 3a 所示,其亮温差异不明显,经过阈值处理之后,天空没有判断出卷云存在(图 3b 中蓝色表示天空无云,白色表示天空有云)。

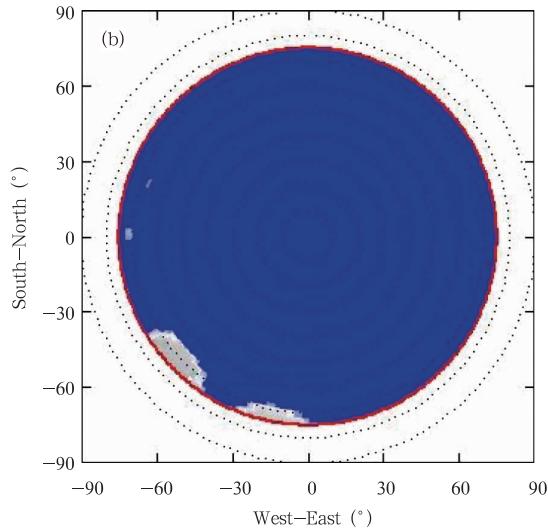


图 3 2011 年 2 月 19 日 12 时 30 分开始扫描的中国科学院大气物理研究所实验楼楼顶获取的天空有卷云图像
(a. 红外亮温图像, b. 经过亮温阈值法判断云点之后的图像)

Fig. 3 (a) All-sky brightness temperature at 12:30 BT 19 February 2011 at Beijing (at the top of the Laboratory Building of IAP) under the sky conditions dominated by cirrus. (b) The processed image derived from the TB threshold method, where white represents cloud and blue represents cloudless

3.2 提高高薄云识别能力的原理基础

3.1.1 和 3.1.2 节分别简述了可见光与红外天空成像仪识别云与晴天的物理原理、方法以及相关的在高云识别中的局限性。应该指出,这些局限性是当前中外在此方面研究所面临的公共难题(霍娟等,2006b; 章文星,2010; Feister, et al, 2010)。要改进高薄云的识别能力,需要挖掘从观测信息提取云-晴空的新方法。为此,对可见光和红外天空成像分别提出如下可能的高云提取办法。

(1) 可见光成像仪,提高高卷云提取能力的可能途径是,利用全天空成像图像对于以太阳-天顶为连线的主平面两边相元特性的对称性来判断云的存在。对于无云天空而言,以主平面为分界的左右两

半平面相元其像元特性是轴对称的。因此,在首次用蓝红比阈值法判断天空为无云的情况下,可以利用轴对称的原理来判别薄高云,特别是高卷云的存在与否。因为在绝大多数情况下,高卷云是不可能相对于主平面对称的,更不可能在几分钟内稳定不变并对称存在。这就提供了在阈值判别为无云情况下进一步判断是否存在高卷云的可能。

(2) 红外成像仪,提高高卷云提取能力的可能途径是,利用同一仰角扫描时所得不同方位角亮温分布的非均匀性来判断云的存在。对于无云天空而言(或同一仰角所有方位角均无云),同一仰角不同方位角所得亮温值是完全一致的。而在同一仰角中,在有云的方位上亮温值一定高于无云的值,即无云

方位亮温最低。由此可以推测,在用物理-统计反演已经判别为无云的情况下(全天空或已被判别为有云区域以外的天空区域),可以对同一仰角“无云”方位上的亮温进行比较,利用其不均匀性,将高于传感器不确定性以上的高亮温方位判断为有云。

以上两个方面的判别原理都是在已有物理反演判别为无云的基础上,对观测图像信息的进一步判别,其可行性与有效性将在下节中加以试验与分析。

4 试验与结果

4.1 基于可见光图像对称性的高薄云反演

将全天空可见光图像以过太阳中心与天顶的主要平面的直径(图 4a、5a 红色虚线)一分为二,则在晴天情况下两边应该是对称的;若两边分布对称性不强,则至少某边可能有高卷云出现,且根据不对称性可获取该云块的方位。

本文在实现对称判别的技术处理中,发展了相关的处理方案。全天空可见光成像观测系统中含有太阳跟踪装置用来跟踪太阳并遮挡太阳直射光,达到保护相机 CCD 的作用。但太阳档杆给后续研究带来了许多不便,故采取形态学和标记选取连通域

的方法去除遮挡片(图 4b、5b)。该方案去除太阳档杆,对后续云的研究影响不大,即云状云量没有大的变化,且消除了部分给后续处理带来误差的噪声,故而有一定实用性。需要说明的是,当太阳档杆与鱼眼图像边缘有区域重叠且灰度很接近时将难以去除。但这种情况对本文讨论的主观情况并无影响,是可以适用的。

这里以西藏羊八井观测台 2009 和 2010 年同一时刻可见光成像仪所获取的图像为例说明。若两个时刻天空均为晴空(或同方位角同天顶角处无云),则两者同方位角同天顶角上的辐亮度应该相同。获取的可见光图像(图 4a)上有卷云,图 5a 上无云。将拍摄图像以方位角和天顶角为轴,分别获取其红色通道分量值(图 4c、5c, 方位角顺时针为正, 太阳中心为 180°)。对比可以看出,天空有卷云时,以太阳为对称中心的两侧图像对称性弱(图 4c);而天空为晴空时,图像的对称性强(图 5c)。全天空可见光图像要实现高云识别,需要考虑地面能见度、太阳高度角等,而通过可见光图像的对称性比对,地面能见度的影响减低,设定一个对称阈值,就能提高对高卷云的识别率。

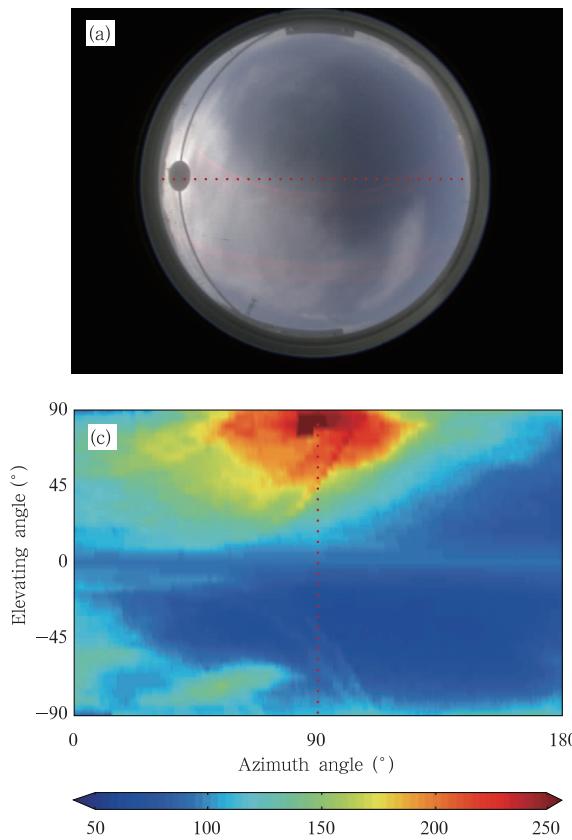


图 4 2010 年 4 月 17 日 08 时 50 分西藏羊八井的天空有卷云图像

(a. 可见光图像,b. 去除太阳遮挡片之后,c. 以高度-方位角为轴的全天空红色分量)

Fig. 4 (a) Visible all-sky image at 08:50 BT 17 April 2010 at Yangbajing, Xizang, under the sky conditions dominated by cirrus. (b) The processed image derived from eliminating occultor and small noise. (c) The corresponding all-sky image acquired in the red region

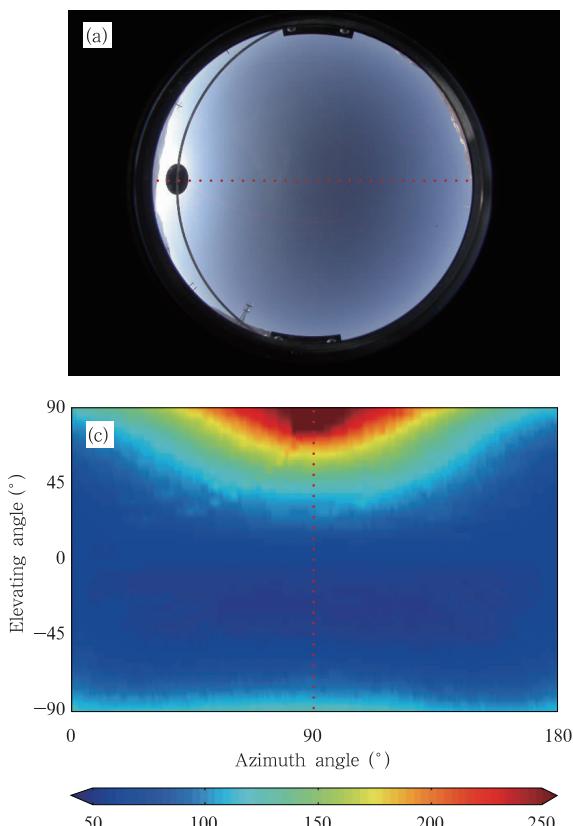


图 5 2009 年 4 月 17 日 08 时 50 分西藏羊八井的晴空图像

(a. 可见光图像, b. 去除太阳遮挡片之后图像, c. 以高度-方位为轴的全天空红色分量)

Fig. 5 (a) Visible all-sky image at 08:50 BT 17 April 2009 at Yangbajing, Xizang, under the clear sky condition. (b) The processed image derived from eliminating occultor and small noise. (c) The corresponding all-sky image acquired in the red region

4.2 基于亮温分布非均匀性的高薄云反演

4.2.1 红外图像上晴空与高云辐射特征对比

首先选择天空中有(无)云的个例为研究对象。全天空红外扫描成像系统扫描获得全天空亮温分布信息,从某时刻天空中有卷云的情况(图 6)可以看

出,由于仪器附近建筑物的影响,全天空红外扫描成像系统低仰角时亮温变化较大。当扫描仰角大于某一值(约为 30°),高空有云时各方位亮温变化大且各层仰角亮温变化相异(图 6b),这与晴空图像不同(图 7b)。当天空为晴空(图 7a)时, 30° 仰角以上的

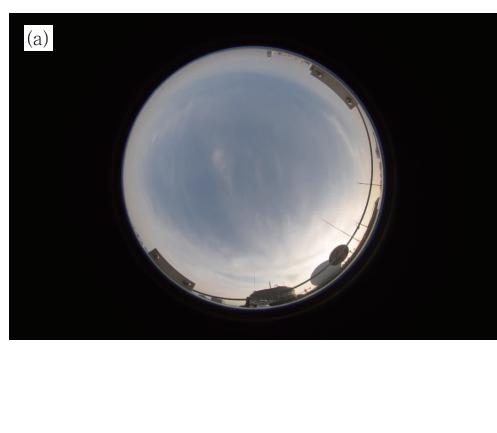


图 6 2011 年 2 月 3 日 16 时中国科学院大气物理研究所实验楼楼顶获取的天空有卷云图像
(a. 可见光图像, b. 各方位各仰角的亮温)

Fig. 6 (a) Visible all-sky image at 16:00 BT 3 February 2011 at Beijing (at the top of the Laboratory Building of IAP) under the sky conditions dominated by cirrus. (b) The corresponding all-sky TB distribution

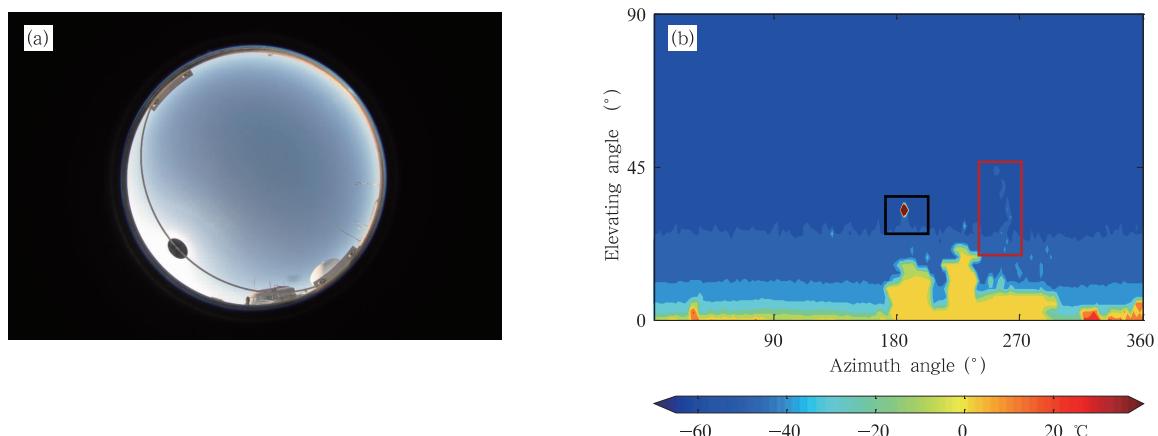


图 7 2011 年 2 月 11 日 09 时 45 分中国科学院大气物理研究所实验楼楼顶获取的晴空图像
(a. 可见光图像, b. 各方位各仰角的亮温分布)

Fig. 7 (a) Visible all-sky image at 09:45 BT 11 February 2011 at Beijing (at the top of the Laboratory Building of IAP) under the clear sky condition. (b) The corresponding all-sky TB distribution

亮温鲜有高值,且变化平缓。这是由于当有高云薄且稀密不匀时,红外各圈扫描所得到的红外亮温不一(云稍厚处的亮温较高,云稍薄处亮温较低)。其中,从约 30° 到 45° 仰角,方位角 270° 处有块亮温的固定变化值(图 6b、7b 红色框内),这是全天空红外扫描成像系统观测站周围的避雷针所引起的。为获取云点识别的判断标准,可做出该全天空红外扫描成像系统在当地的晴天模板,作为后续判断卷云和晴空的依据之一。

建立一个晴天标准,对某段时间内红外扫描的亮温值 $G(x, y)$ 与对应全晴天的亮温值 $G_{\text{mask}}(x, y)$ 求异,若差值不大(在一定阈值内),则可以判断该天为晴天,反之为卷云。使用同一全天空红外扫描成

像系统同一地点扫描的数据,求异将剔除部分阻挡物的影响,从而减少误差并使处理方便。如图 8a 所示,晴空与卷云亮温值差异较大,而图 8b 中晴天与晴天求异的差异较小。此外,需要说明一点,图 7b 中一块亮温很高的区域(图 7b 黑色框内)是由太阳引起的,这种情况可以利用已知太阳不同时刻位置来进行预去除。

不同地域,全晴天的模板不同。将第 3 类数据,即晴空时的红外亮温数据去除太阳影响后求平均亮温,以此建立晴天模板,分别以卷云与晴天情况做判别试验,结果发现,差值较大样本的有卷云,从而达到了判别高云的目的。

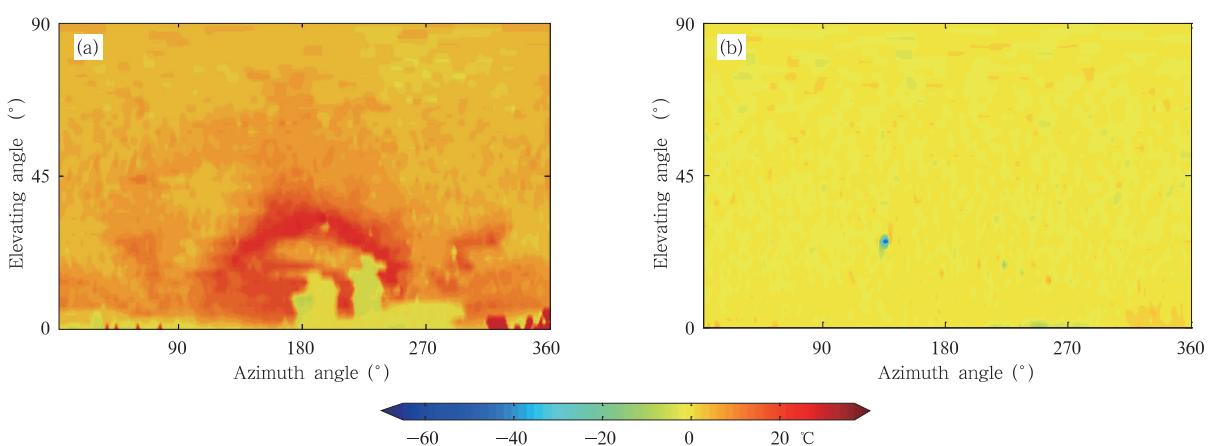


图 8 中国科学院大气物理研究所实验楼楼顶获取的全天空红外扫描成像系统图像
(a. 卷云与晴空扫描亮温差, b. 晴空与晴空模板亮温差)

Fig. 8 All-sky brightness temperature at Beijing (at the top of the Laboratory Building of IAP) (a. the difference between the clear sky and the sky dominated by cirrus; b. the difference between the clear sky and the mask of clear sky)

4.2.2 晴空-高云天各仰角亮温变化

观测地域不同, 大气温、湿度廓线, 特别是低层大气温、湿度分布不同, 红外成像仪在各仰角高度扫描时所获取的亮温可能会有差异。对于同一地点的晴空来说, 仪器系统噪声也会引起各层的亮温在一定范围内变化。若某个观测时刻在同一仰角上某一或某些方位出现超出仪器噪声范围的亮温相对高值, 则可以判断在该方位上有高薄云出现。

选择 10 个第 3 类数据, 即中国科学院大气物理研究所实验楼楼顶 1—3 月晴天(全天空红外扫描成像系统也判断为晴空)的例子。其中, 各案例第 11 档到 40 档一共 30 个仰角, 即 23.625° — 88.875° 仰角数据受建筑物的影响较小。图 9a₁、b₁ 是 23.625° 、

25.875° 等仰角扫描亮温的均值(单位 $^{\circ}\text{C}$), mean 表示某次观测 30 个仰角亮温数据的均值; 每个仰角观测各获取一个亮温的均方根差值, 图 9a₂、b₂ 为每次观测 30 个仰角均方根差值的总平均值(Average of Root Mean Square Deviation, ARMSD)(去除了极少的明显突变点, 这些突变点被证明是受建筑物影响而产生的温度骤增点, 定义为在某层仰角扫描时, 某探测点的亮温大于前后两个探测点的亮温至少 10°C , 则该探测点为突变点)。同样处理 10 个第 2 类数据, 即中国科学院大气物理研究所楼顶 1—3 月卷云天情况下但全天空可见光成像观测系统、全天空红外扫描成像系统都没判断出有云的例子, 得到图 9b。

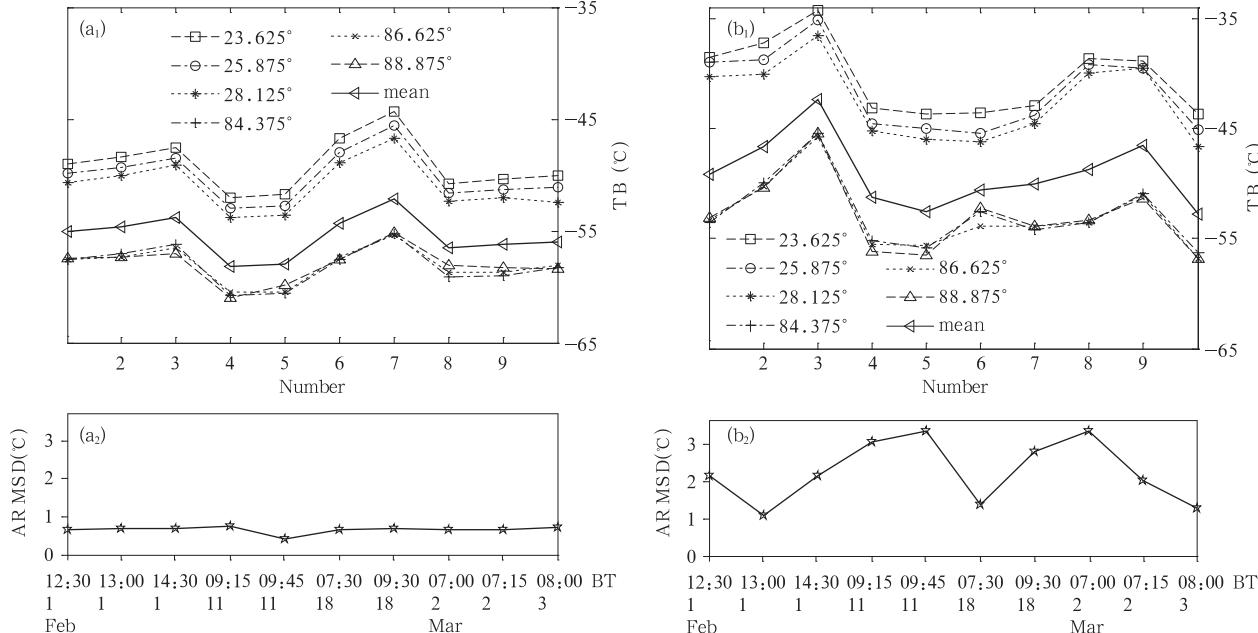


图 9 中国科学院大气物理研究所楼顶 1—3 月获取的晴空情况下各个仰角亮温的平均值及每次观测的平均值及(a₁、b₁)及 30 个仰角的 ARMSD(a₂、b₂) (a. 晴空, b. 有卷云)

Fig. 9 Data collected for the period Jan to Mar, 2011, at Beijing (at the top of the Laboratory Building of IAP)
 a₁. the average of IR brightness temperatures of different elevations and the average TB for each observation, under the clear sky condition; a₂. the ARMSD of the 30 elevations; b₁. the average of IR brightness temperatures of different elevations and the average TB for each observation, under the sky conditions dominated by cirrus; b₂. the ARMSD of the 30 elevations

比较图 9a₂、b₂ 可以看出: (1) 晴空的 ARMSD 值较小, 各层仰角的亮温偏低; (2) 当天空有卷云时, ARMSD 值较大, 各仰角的亮温偏高。这说明天空有高云, 尤其是不连续、稀密不匀的云时, 某层或几层亮温波动幅度将大于晴空亮温, 且这些层的亮温均值明显大于晴空时亮温。以此, 利用亮温分布的

“不均匀性”, 找出晴天时各层亮温的变化范围和 ARMSD, 与实际情况下的值进行比较, 就可以判断出天空中高云的存在。判断中国科学院大气物理研究所实验楼楼顶 1—3 月天空中是否有高云的流程框图如图 10 所示。对于不同大气温湿条件, 需要改变 ARMSD、mean 的阈值再做判断。图 10 的框图

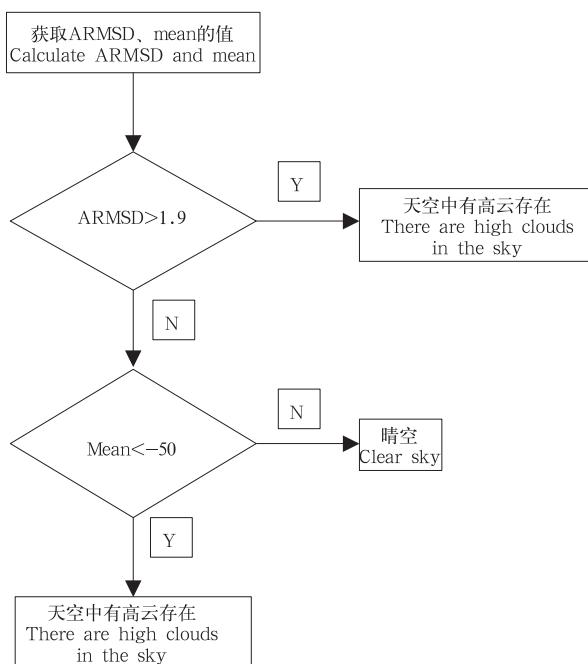


图 10 利用亮温数据判断有-无高云的流程

Fig. 10 Flow chart for discriminating high clouds existence in the sky using the TB data

是利用精细的统计特性来判别高云与晴空,其在特定区域与特定季节有很好的实用性。其中,阈值是在保证晴空情况下不会出现误判的条件下给出的。

从图 9 中可以看出有些亮温变化从低到高,这是因为随着太阳位置的变化天空中各点所获得的太阳辐射能量不一样。因此,若将数据按时间分成多阶段再来计算会减少误差。对此,本文不再赘述。

4.3 高薄云情况下算法的敏感性试验

天空中主要为高薄云时,用阈值法或其延伸的算法来判别有、无云点是有一定局限性的,可见光-红外测云与目测云的结果相关性较低,常常会出现

漏判或误判。Souza-Echer 等(2006)利用数字相机在可见光光谱范围内拍摄天空云图,用饱和度作为云点判别因子,结果发现对不确定云(薄云或晴空),识别的结果与两个观测员判别结果相比,相关系数仅为 0.09 和 0.15(Souza-Echer, et al, 2006)。章文星等(2010)利用北京市气象局南郊观测台 2007 年 4—8 月人工观测有卷云的案例与红外成像仪观测的数据进行对比,相关系数仅为 0.1988。除去人眼主观识别的误差,以往算法在高云方面识别的缺陷性也是不可回避的问题。

本研究对中国科学院大气物理研究所实验楼楼顶 2011 年 1—3 月的数据进行分析。选出目测有高薄云且全天空可见光成像观测系统与全天空红外扫描成像系统同时观测的案例 157 个,经过阈值法之后可见光识别出来的有 69 个,红外识别出来的有 13 个,识别率分别为 43.9% 和 8.3%。

在可见光未能识别的 88 个案例中,利用太阳-天顶为连线的主平面两边相元特性的对称性判别出 47 例天空中有卷云,最终得到卷云的识别率为 73.9%。

在红外未能识别的 144 个案例中,利用红外扫描的亮温值(太阳位置的亮温值用前个扫描点替代)与晴空模板求异(保证晴天情况下不会出现误判:各点亮温差异小于 25° 仍判为无云)。判别出有 71 例有卷云,最终得到卷云的识别率为 53.5%。按照图 9 的算法进行处理,识别出来 97 例有卷云,最终得到卷云的识别率为 70.1%。

再分析仍没有判出来的案例。图 11a、b 为相隔 4 min 的全天空可见光图像,天空中云型变化较快,全天空红外扫描成像系统要想全记录下 4 min 内天空亮温的变化难以实现。从图 11b 可以看出,当高



图 11 2011 年 1 月 20 日 08 时 39 分(a)和 42 分(b)中国科学院大气物理研究所实验楼楼顶获取的全天空可见光图像



Fig. 11 Visible all-sky image at 08:39 BT (a) and 08:42 BT (b) 20 January 2011 at Beijing (at the top of the Laboratory Building of IAP) under the sky conditions dominated by cirrus

薄云离观测中心距离远,全天空可见光成像观测系统和全天空红外扫描成像系统观测近地平面或下垫面时,天空大气散射辐射比与云的特征已经较为接近,难以判断出云与背景晴空。图 12 是某天天空中

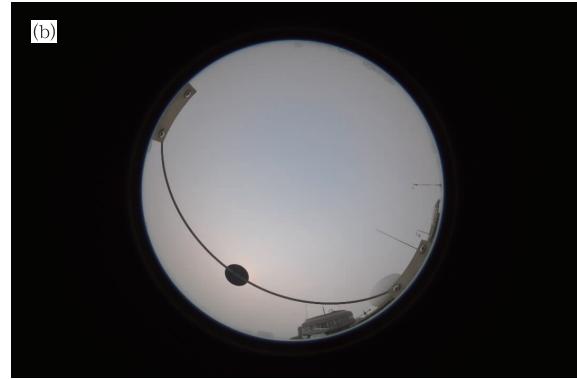
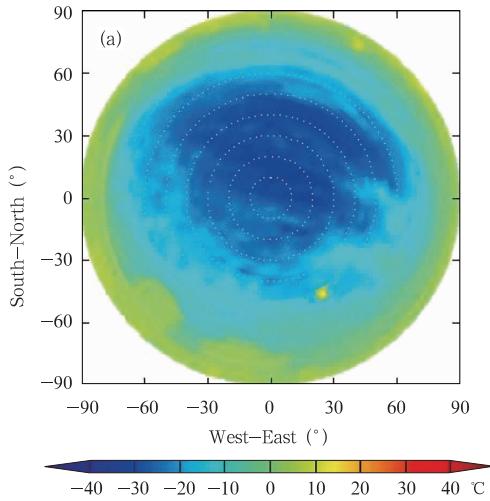


图 12 2011 年 2 月 23 日 10 时 45 分开始扫描的中国科学院大气物理研究所实验楼楼顶红外亮温图像(a)和 10 时 48 分扫描的可见光图像(b)

Fig. 12 (a) All-sky brightness temperature at 10:45 BT 23 February 2011 at Beijing (at the top of the Laboratory Building of IAP) under the sky conditions dominated by cirrus.
(b) The corresponding visible all-sky image at 10:48 BT 20 January 2011

5 总 结

针对当前全天空可见光成像观测系统和全天空红外扫描成像系统测量高云方法的不完善,本文利用物理-统计关系和云-晴空辐射特征的差异来提高对高云的识别率,归纳如下:

(1)在已有蓝红光阈值法判别云的基础上,进一步判别可见光图像是否有高云,可利用以太阳-天顶为连线的主平面两边像元特性的对称性。对称性越强说明天空越是晴朗,反之则天空中可能有高薄云出现。由此,建立全天空的灰度对称性关系在一定程度上可以降低能见度对可见光判别云的影响,使得部分高薄云能够被识别出来。

(2)对红外亮温仪,在已有物理统计反演算法识别云基础上,进一步对高薄云进行识别,利用红外亮温图像上高卷云与晴空的辐射特征的差异,即有云点亮温总比同仰角背景天空高。因而利用同一仰角不同方位亮温值的差异,有可能在物理统计判别为晴空的方位上检测出高薄云的存在。本文利用中国

科学院大气物理研究所楼顶的数据建立晴天模板并比对晴空与卷云情况下的各自差异,从而判断出高薄云。

全天空的云研究工作在逐步发展。将可见光全天空成像仪与红外全天空成像仪结合起来提高天空中云的信息量具有重大的意义,这将降低天空无云时的误判,这是下一步需要深究的问题。本文利用两者,在已有研究基础上提高了对卷云、晴空的识别率。试验表明这种改进算法将进一步提高现有云像仪对高云的识别能力。这一改进算法在 2011 年末中国气象局进行的云自动化观测仪器对比试验中得到实际应用。

致谢:在此对宣越健高工、李晖等研制红外观测设备表示感谢,并对参与观测的人员表示感谢。

参考文献

- 霍娟, 吕达仁, 王越. 2006a. 全天空云识别阈值法的数值模拟初步研究. 自然科学进展, 16(4): 480-484
霍娟, 吕达仁. 2006b. 晴空与有云大气辐射分布的数值模拟及其对全天空图像云识别的应用. 气象学报, 64(1): 31-38

- 章文星, 吕达仁, 常有礼. 2007. 地基热红外亮温遥感云底高度可行性模拟研究. 地球物理学报, 50(2): 354-363
- 章文星, 吕达仁, 宣越健等. 2010. 利用扫描式红外亮温仪对天空云量的试验观测. 气象学报, 68(6): 808-821
- 中国气象局. 1997. 地面气象观测规范. 北京: 气象出版社, 155pp
- Bozzo A, Maestri T, Rizzi R. 2010. Combining visible and infrared radiometry and lidar data to test simulations in clear and ice cloud conditions. *Atmos Chem Phys*, 10(15): 7369-7387
- Feister U, Möller H, Sattler T, et al. 2010. Comparison of macroscopic cloud data from groundbased measurements using VIS and IR instruments at Lindenberg, Germany. *Atmos Res*, 96 (2-3): 395-407
- Huo J, Lu D. 2009. Cloud determination of all-sky images under low-visibility conditions. *J Atmos Ocean Technol*, 26 (10): 2172-2181
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis // Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA:Cambridge University Press
- Long C N, Slater D W, Tooman T. 2001. Total sky imager model 880 status and testing results. ARM Technical Report, ARM TR-006, US Department of Energy, Washington DC
- Mallama A, Degnan J J. 2002. A thermal infrared cloud-mapping instrument for observatories. *Astronomical Society of the Pacific*, 114(798): 913-917
- McGuffie K, Henderson-Sellers A. 1989. Almost a century of "Imaging" could cover the whole-sky dome. *Bull Amer Meteor Soc*, 70(10): 1243-1253
- Pfister G, McKenzie R L, Liley J B, et al. 2003. Cloud coverage based on all-sky imaging and its impact on surface solar irradiance. *J Appl Meteor*, 42(10): 1421-1434
- Shields J E, Richard W J, Monette E K, et al. 2003. Daylight visible/NIR whole-sky imagers for cloud and radiance monitoring in support of UV research programs. *Proc SPIE*, 5156(6): 155-166.
- Souza-Echer M P, Pereir A E B, Bins L S. 2006. 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*, 23(3): 437-447