0577-6619/2010/68(6)-0808-21 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

利用扫描式红外亮温仪对天空云量的试验观测*

章文星[1] 吕达仁[1] 宣越健[1] 苏德斌[2] 徐文静[2] 霍 娟[1]

ZHANG Wenxing[1] LÜ Daren[1] XUAN Yuejian[1] SU Debin[2] XU Wenjing[2] HUO Juan[1]

1. 中国科学院大气物理研究所 中层大气与全球环境探测实验室，北京 100029

2. 北京市气象局，北京 100089

1. *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing* 100029, *China*

2. *Beijing Meteorological Bureau, Beijing* 100089, *China*

2008-08-11 收稿，2008-10-25 改回.

Zhang Wenxing, Lü Daren, Xuan Yuejian, Su Debin, Xu Wenjing, Huo Juan. 2010. An experiment study of cloud cover detection by ground based sky thermal infrared brightness temperature measurements. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(6):808-821

Abstract Measurements of sky thermal infrared brightness temperature (TB) were conducted during the period of April to August in 2007 at the Beijing Meteorological Observatory, using an automatic scanning infrared thermometer (SIRIS-1) developed by the Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation (LAGEO), the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences. Cloud cover in the sky was calculated by using the data of TB and the real time surface weather data provided by the Beijing Meteorological Observatory (No. 54511). The comparison was made between the two kinds of cloud cover, one was observed by observer in the Beijing Meteorological Observatory, and another was the averaged cloud cover observed by SIRIS-1 over the half hour before each round hour. The results show that (1) for middle and low cloud situations, if the cloud in the sky does not change very fast during the half hour before round hour, the two kinds of cloud cover are very consistent with each other; if the cloud changes rapidly, the difference is great. The reason is because the method and the time period of observation are different. (2) For the sky situation dominated by cirrus, the difference between the two kinds of cloud cover is great due to the limitation of infrared sensor (−50℃) used for measurements and the poor ability of threshold determination to distinguish thin cirrus from clear sky at present, especially for thin cirrus, very high in the sky. (3) For complex cloud situations with poor visibility (e. g. cloud cover 10− as is recorded by meteorological observer), the difference of the two kinds of cloud cover is also great. The difference was caused either by the characteristic of instrument, or by observer's ability of visual observation and experience. As far as the instrument is concerned, the lowest measurement temperature (−50℃) limits the ability of high cloud sensing, and the uncertainty of the cloud retrieval is also a key factor. In addition, the poor horizontal visibility may restrict observer's ability of visual observation. The cloud cover measurements by the SIRIS-1 demonstrates the distinct superiority of high temporal resolution and all-sky automatization but the ability of infrared sensor currently used to sense high cirrus is insufficient.

Key words All-sky IR scanning imager, Automatic cloud observation, Cloud cover, Cloud base height

摘 要 利用中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室自主开发研制的全自动扫描式天空红外亮温仪，于2007年4—8月在北京市气象局南郊观象台进行了试验观测。利用获得的天空红外亮温数据和南郊观象台(54511站)实时地面气象数据，进行了天空云量的计算。将整点前30 min内观测的云量的平均值作为与观象台观测对应的整点观测云量，分不同情况与观象台目视观测结果进行了对比分析。结果表明：(1)对于中低云，两种观测的云量比较一致，但如果在此期间

* 资助课题：国家自然科学基金项目(40475013，40775026 和 40505006)。

作者简介：章文星，主要从事气溶胶、云遥感和辐射传输模式应用研究。E-mail：zwx@mail.iap.ac.cn

云消散或增加很快,则差别较大。其主要原因是观测的时间和方式不同所造成的。(2)对于以卷云为主的天空情况,特别是高层薄卷云的情况,两种观测的云量差别较大。原因是受到目前试验所使用的红外传感器低温测量范围的限制(-50℃),以及判定云的阈值算法目前还只对于中低云比较适用,对于卷云的判断能力比较薄弱。(3)对于天空情况比较复杂,以及能见度不好的情况(气象站目视云量记录为10-),两种观测的云量差别也很大。其差别既受到仪器性能的影响,也与观测员视力与经验有关。仪器受到最低测量温度的限制,反演算法也有其不确定性,而观测员在低能见度时的观测局限性亦是一个重要原因。利用SIRIS-1进行云量和云底高度观测的优点是时间分辨率高,且全天时自动化,但对于卷云的判断还较薄弱。

关键词 全天空扫描红外成像仪,云自动化观测,云量,云底高

中图法分类号 P412.15

1 引 言

研究表明云的变化对于辐射和全球气候的影响是非常重要的,由于云的时空分布变化的复杂性,迄今为止云的辐射强迫作用仍然是气候变化研究中关键的不确定因素(Stemphens, 2005),如何准确、及时地获取云的信息,对于气候学研究(刘洪利等,2003)、天气预报、人工影响天气以及国民经济和军事等诸多领域都十分重要。因此,近年来云特性的研究越来越受到人们的广泛关注,各国科学家都进行了许多努力(吕达仁等, 2003),用各种观测手段(卫星(Rossow,et al, 1991)、地面辐射(Durr,et al, 2004)、激光雷达(Bagtasa, et al, 2007)、可见光(Pfister, et al, 2003; 霍娟等, 2002)和红外成像(Mallama,et al, 2002; Shaw et al, 2004)等)进行了观测与算法研究(Kassianov, et al, 2005; Li, et al, 2006),并进行了对比和验证(王可丽等, 2001; Martins,et al, 2003; McCarthy,et al, 2007)。然而各种观测方法都有其优缺点和局限性。就局地观测而言,卫星观测的时空分辨率不够高,激光雷达主要用于定点天顶方向观测,可见光成像不适用于夜间观测,所以目前气象站对云量的观测主要还是以人工目测为主。受到目测视野和观测条件的限制,人工观测次数极为有限,且判断标准不可能严格一致,使得地面站的云量资料时空连续性较差。由于不论白天或夜间,云在红外(8—14 μm)波段都具有相同的红外辐射特性,因此可以利用红外成像仪对天空进行观测,根据全天空红外辐射强度的实时分布来进行全天候云量的观测。但是由于红外成像仪成本较高,目前还不能推广到所有观测站进行常规观测。因此,发展一个较为准确客观且成本较低的观测手段,进行连续自动观测是各国地面气象自动化观测的迫切需求。为此,中国科学院大气物理研究所自主开发研制了扫描式红外亮温仪(Scanning infrared thermometer,简称SIRIS-1),用于进行云底高度和云量的观测,并且初步发展了利用天空红外亮温(Infrared Brightness Temperature,简称TB)和地面气象参数反演中低云云底高度的初步方法(章文星等, 2007)。2007年4—8月,利用该观测仪器,在北京市气象局南郊观象台进行了TB自动观测实验。利用这些观测资料,进行了天空云量的统计计算,并且与南郊观象台每天4次的云量观测进行了对比。本文介绍了观测和对比情况;对两种观测产生的差异,进行了物理、技术与人为局限的原因分析,最后提出了对红外云自动化观测技术与方法的改进意见。

2 仪器介绍

中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室(LAGEO)自主开发的扫描式全自动天空红外亮温仪SIRIS-1(图1)。其结构由热红外感应头①,双轴(仰角②,方位③)步进马达姿控平台系统和微机组成(图2)。热红外感应头①安装



图1 SIRIS-1外形
Fig. 1 A photo for the SIRIS-1

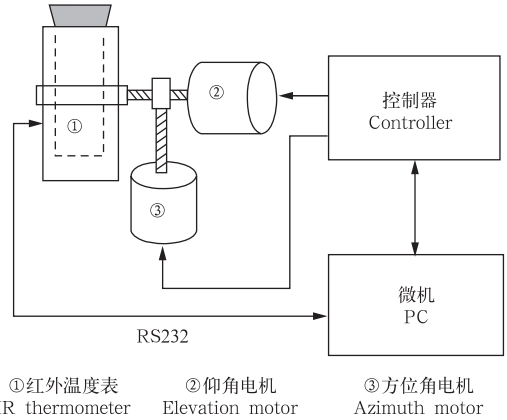


图 2 SIRIS-1 结构示意图
Fig. 2 Block diagram for the structure of the SIRIS-1

在双轴姿控平台上,由微机控制实现对天空进行扫描观测。核心部件是安装在热红外感应头内的,由德国 HEITRONICS 公司生产的 KT15.83 II 型低温红外温度传感器。在热红外感应头内还安装有温度测量电路和控制电路,用于监测环境温度和传感器内部温度,控制观测和数据传输等。

观测由微机控制按照用户输入的时间间隔自动进行。观测方式可以按照用户的要求选择全天空扫描;或固定方位角(或仰角),只变动仰角(或方位角),在固定的天空范围内进行扫描;或对地进行扫描观测。每次观测开始时,微机首先给控制器和热红外感应头发出命令,启动控制程序驱动步进马达工作,带动热红外感应头对天空进行扫描,与此同时,测得的 TB 数据经数据传输线传输至微机进行存储、显示及后续处理。仪器外部还装有降雨监测器,在全自动观测状态时,如果降雨监测器探测到降雨,控制器将置于停机状态,热红外感应头垂直对地,以保护仪器的光学系统。

KT15.83 II 型低温红外亮温传感器的主要技术指标:工作波段为 8—14 μm,温度测量范围为 -50—+200℃,视场角 2°,工作环境温度 -20—60℃。温度分辨率:当目标温度为 -25℃,测量时间为 100 ms 时,为 0.35 K;测量时间为 1 s 时,为 0.10 K。精度为 ±0.5℃加上 0.7%乘以目标温度与传感器内部温度之差。稳定度好于 1‰。

3 天空红外亮温观测情况和云量的计算

从地面向天空任一方向观测,在热红外波段(8—14 μm)均可感测到来自该方向的热辐射(以辐射率或亮温表示)。原因是视线路径上存在着水汽等热红外波段上的发射/吸收气体和云(如果存在)。利用 SIRIS-1 对天空进行扫描观测,在晴空方向上,接收到的热辐射只取决于观测大气路径上水汽和气温的分布,一般 TB 很低,其值可以由水汽、温度廓线分布作为输入,通过辐射传输方程精确计算获得;当视线方向有云时,热辐射来自云和大气路径两部分。由于云是热红外波段的强发射体,不是很厚的云在热红外波段就可以看作黑体,即以云底高度所具有的温度向观测点作黑体辐射,因此,任何方向上一旦有云,其 TB 值就一定比无云天空高,从而可以判断该方向上云的存在。大气在绝大部分情况下是高度越高,温度越低。其观测结果是云越低,测得的 TB 越高。因此可以根据 TB 阈值(或红外辐射阈值(Shaw,et al, 2004))来区分观测方向天空是否有云。中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室以物理-统计反演法和红外辐射传输算法为基础,利用历史探空资料作为输入值,已经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、水汽与观测的 TB 之间的统计关系。因此可以基于该统计关系式,确定一个 TB 动态阈值来判断观测方向上是否有云。如果在观测方向上测得的 TB 小于这个动态阈值,那么就认为该观测方向为晴空,反之则判断为有云。

为进行 SIRIS-1 的云观测与气象台目视云观测的对比,在北京市气象局南郊观象台进行了 TB 观测。观测方式是一维仰角扫描,即从正北地平开始(仰角为 0°),仰角以 2°间隔逐渐增加,同时进行 TB 观测,先至天顶(仰角为 90°),然后再逐渐降低至正南(180°),再继续降至对地(270°),然后返回,如此往复。完成一次完整(0—270°)的扫描观测过程为一次观测,所用时间约为 110 s。TB 观测是全天时连续自动进行的,但是如遇下雨天气,为保护光学部件,仪器自动停止观测。2007 年 4 月下旬至 8 月的观测数据见表 1,表中最后一列为对应南郊观象台每天 4 个观测时次的观测次数。

表 1 2007 年 4 月下旬至 8 月 SIRIS-1 的观测数据
Table 1 Measurement times using the SIRIS-1 from April to August 2007

月份	有效观测天数	有效观测次数	对应观象站观测的次数
4 月	4	2740	14
5 月	30	21016	105
6 月	20	12125	60
7 月	13	8177	43
8 月	27	15560	79

图 3 给出的是 2007 年 5 月 2 日的观测结果,在 10 时 10 分的可见光全天空照片(图 3a)中,红线为南北往复地进行 TB 扫描观测的视线轨迹。从全天的 TB 扫描观测结果(图 3b)可以看到,00—03 时观测仪器上空无云,TB 很低。从 01 时 TB 随观测仰角的变化曲线(图 3c)可以看到,天顶附近亮温低于温度观测范围,因而饱和截止于 −50℃,并且南北方向 TB 分布均匀对称。04 时左右天空云量逐渐增加,TB 增高。10 时 10 分的观测结果(图 3d)表明,TB 随观测仰角的变化较大。当观测仰角视线方向遇到低云和厚云时,TB 高;遇到晴空或薄云的时候,TB 低。17 时以后,TB 较高且分布比较均匀,转为比较均匀的中低云,如 20 时的 TB 观测结果(图 3e)。

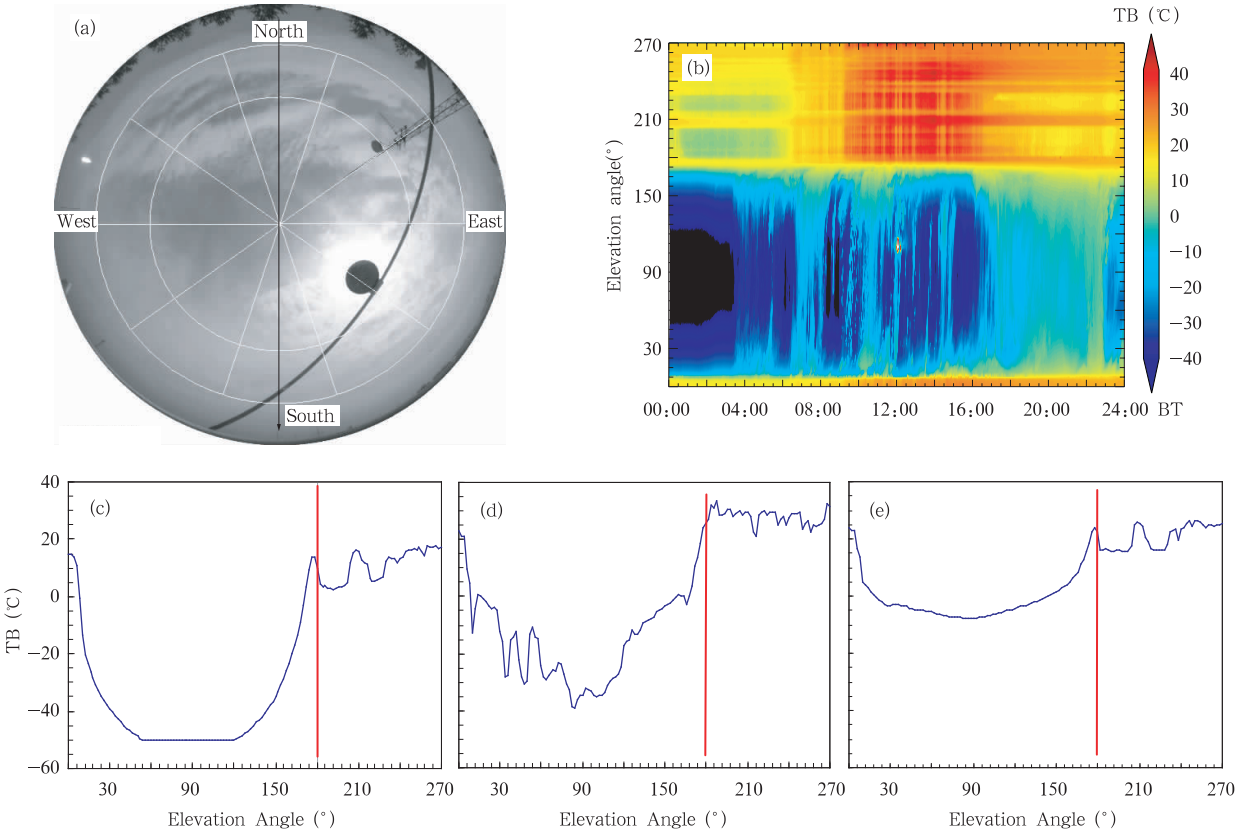


图 3 2007 年 5 月 2 日的观测结果

(a. 10 时 10 分的可见光全天空照片;b. 全天 24 h 的 TB 观测值,颜色代表温度,纵坐标为扫描观测的仰角,其中 0—180°为对天空观测,180—270°为对地观测;c、d、e 分别为 01 时、10 时 10 分及 20 时 TB 随观测仰角的变化)

Fig. 3 Observations on 2 May 2007

(a. All-sky photo at 10:10 BT; b. all-sky temperature is colored, vertical axis represents the elevation angle of scanning observation, 0—180° is to the sky direction, and 180—270° for the earth observation; c–e. TB vs. elevation angle at 01:00, (d) 10:10 and 20:00 BT, respectively)

上述观测方式,每一次观测的云量应为天空方向扫描线部分(0—180°)中所含有云部分的成数,但是为了避免低层气溶胶的影响,只对仰角高于 15°以上的天空进行云量统计计算。为了解全天空观测云量和天顶线扫描观测云量的差别,利用可见光全天空照片进行了初步的统计分析。如图 3a 全天空照片中白线所示,将仰角高于 15°的部分均分为面积相等的 20 份。通过人工观察每一张照片,分别估算全部天空(20 份)的云量(云充满为 10 成)和红线所经南北部分(4 份)的云量(云充满为 2 成,折算为 10 成)。当晴空和云覆盖整个天空时,两种方式计算的云量是一致的,全为 0 成,或全为 10 成。因此,为了较好的说明问题,选择了观测期间天空云量变化较大的 7 天共 2011 张全天空照片进行对比

分析。从这 2011 对云量的散点(图 4)分布可以看到,两者的相关性较好,R^2 为0.98;总体平均来说

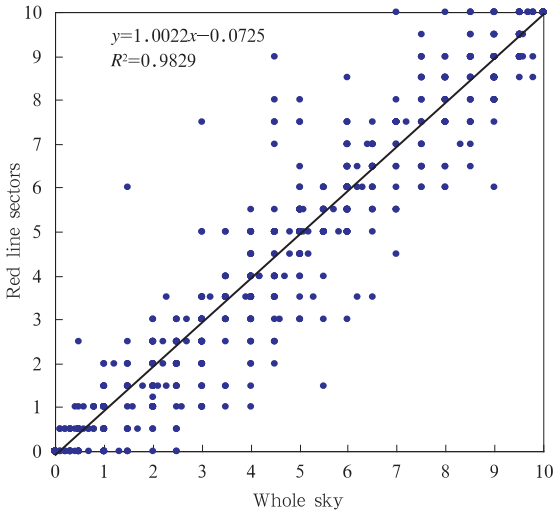


图 4 据全天空照片估算的云量的散点分布
(全天空和红线所经南北部分)
Fig. 4 Scattered plot of cloud covers
(Whole sky vs. Red line sectors, see text for further details) estimated from the whole sky images

红线所经南北部分的云量略小于全天空部分的云量;尽管有些点云量的差值较大,其中相差最大的为4.5 成,但是云量差值的均方差为 0.56,因此可以说明天空南北线扫描方式进行云量的观测具有一定的代表性。

4 SIRIS-1 观测云量与观象台目测云量的对比

图 5 给出了 2007 年 5 月 20—31 日 SIRIS-1 观测的总云量和南郊观象台每天 4 次观测的总云量(以下简称目测云量)的时间序列。实线为目测云量,时间分别是:2 时、8 时、14 时和 20 时(图中云量 11 代表目测记录为 10 - 的情况);点划线为 SIRIS-1 观测云量,时间间隔约为 110 s,24 h 连续观测。图中 22 日 08 时至 23 日 08 时目测为 10 成,而 SIRIS-1 没有观测数据,是因为 SIRIS-1 感测到下雨后,为保护探头,自动停止了观测。从图中可以看到两者随时间变化的大体趋势是一致的,但是许多对应相同时刻的云量差别是较大的。

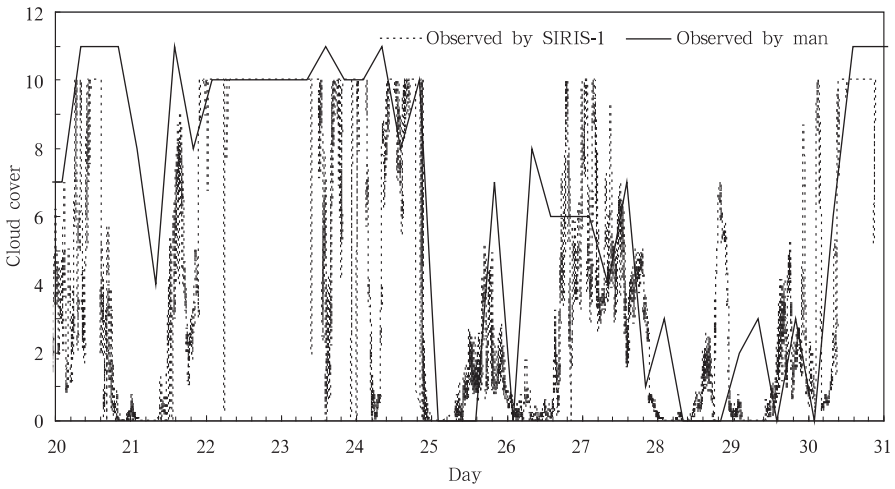


图 5 2007 年 5 月 20—31 日 SIRIS-1 观测云量和气象站的目测云量
Fig. 5 Cloud cover observed by the SIRIS-1 and observer at the Beijing 54511 weather station from 20 to 31 May 2007,
(CFEYE "10-"recorded by observer was plotted as "11" in the figure)

由于线扫描式 TB 观测的时间分辨率高,间隔时间不到 2 min,云量的计算仅基于扫描线部分,而观测员目测每天只有 02、08、14、20 时这 4 个时次观测,每次观测大约为整点前 10 min 左右,具体时间不可能如 SIRIS-1 控制得准确,并且观测范围为全天空,因此,为了进行两种观测云量的对比,分别将目测 4 个时次前后 15 min 内、前 10、15、20 和 30 min 内 SIRIS-1 观测云量的平均值作为对应整点时刻的云量,与目测云量进行了对比。对比结果相关系数 R^2 分别为 0.3813、0.3689、0.3791、0.3796 和

0.3854,整点前 30 min 内平均值(以下简称红外整点云量)的比较结果较好,所以以下的红外整点云量(简称器测)均为整点前 30 min 内 SIRIS-1 观测云量的平均值。

2007 年 4—8 月目测和器测共有同时刻观测次数 301 次。图 6a 给出了各云量成数级两者同时观测次数分布图。图中两者同时观测云量为 0 的次数为 36,占观测总数 11.96%;同时为 10 的次数为 19,占观测总数的 6.31 %。从图中还可以看到气象站目测为 10-(云量 11 代表目测记录为 10- 的情况)的次数占了很大部分,总数是 84,为观测总数的 27.90 %。根据《地面气象观测规范》(QX/T 46—2007)中云量的观测规定,天空完全被云遮蔽,但只要从云隙中可见青天,则记"10-",因此可以认为云量"10-"约等于 10 成。但《地面气象观测规范》中还规定,在受视程障碍影响的特殊情况下,如因烟幕、霾、浮尘、沙尘暴、扬沙等天气现象使天空云量、云状全部或部分不明时,总、低云量记"-",云状栏记该天气现象符号或同时记录可辨明部分的云状。所以说明云量为"10-"还有无法判断的情况。令云量纪录为"10-"的气象站目测为 10 成,图 6b 给出的是两者观测总云量的散点图。从图中可以明显看出,目测云量大于器测云量,而且两者的相关系数 R^2 也只有 0.3854。

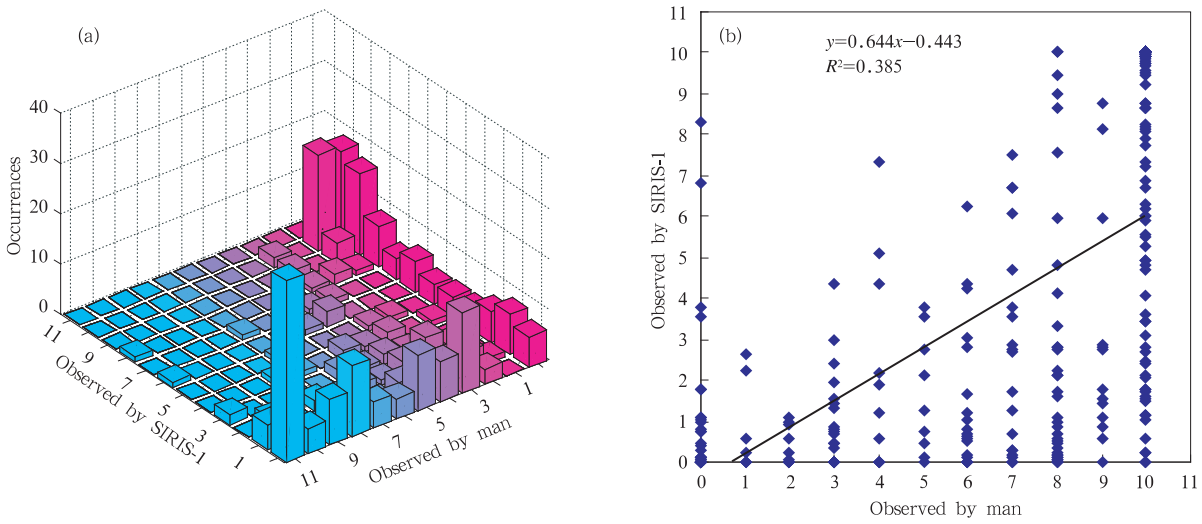


图 6 对应时间目测和器测的各级云量观测次数分布(a)和散点分布(b)

Fig. 6 Cloud covers (observed by man and SIRIS-1) occurrence distribution in grade (a) and scattered plot (b) at the corresponding time

上述两者观测的总云量差别很大。造成不一致的原因是多方面的:(1)观测方式不同。SIRIS-1 观测的云量仅依据天空中线扫描部分,不是全部天空。从上节中的分析结果可以看到,虽然依据图 3a 中红线所经南北部分来计算的云量具有代表性,但是与全天空的云量还是有一定的误差。(2)二者的平均时间不同,器测云量是整点前半小时 SIRIS-1 观测云量的平均,目测云量是观测员整点前 10 min 左右的主观平均值。当天空云快速多变时二者难以一致。(3)不同的观测原理导致不同天空情况下对云的判断能力差异。在能见度好的晴天,观测员能清晰分辨高空薄卷云;而红外亮温判别则处于低温端,识别能力弱。加之受到试验使用的红外亮温仪的最低观测温度范围(-50℃)的限制和高层薄卷云的复杂性,以及目前判断云的 TB 动态阈值的固有不确定性,对于云底越低、云越厚的情况,误差较小,对于云底越高,云层越薄的情况,不确定性越大。(4)在能见度差的雾、霾天气,观测员用肉眼难以判断上空云的变化情况,因而具有一定的主观性,而这时,SIRIS-1 观测依据 TB 值的高低变化,具有客观判断云(高层薄卷云除外)的能力。由于以上几个原因,对于这两种观测的对比会呈现复杂的情况,需要分类进行比对,以更好地揭示二者异同的原因。

4.1 主要云状为非卷云天空的情况

将目测云状(《地面气象观测规范》)(按云属分类)为卷云和主要云状为卷云的观测时次去除以后,

4—8月目测和器测共有同时刻观测121次,其中4月4次,5月45次,6月25次,7月16次,8月31次。将目测为10-的情况近似为10成后,图7a给出了以时间排序的对应时刻目测和器测云量,图7b为两者之差。从图中可以看到云量为0和10成的观测次数占绝大部分,对比结果比包括卷云在内时好了很多,大多数情况下,两种观测的云量比较一致,相关系数 R^2 大于0.82,提高了很多。但是,还是有些时次观测的云量差值较大。下面按目测云量为0、10、10-和1—9成4种情况来分别进行讨论。

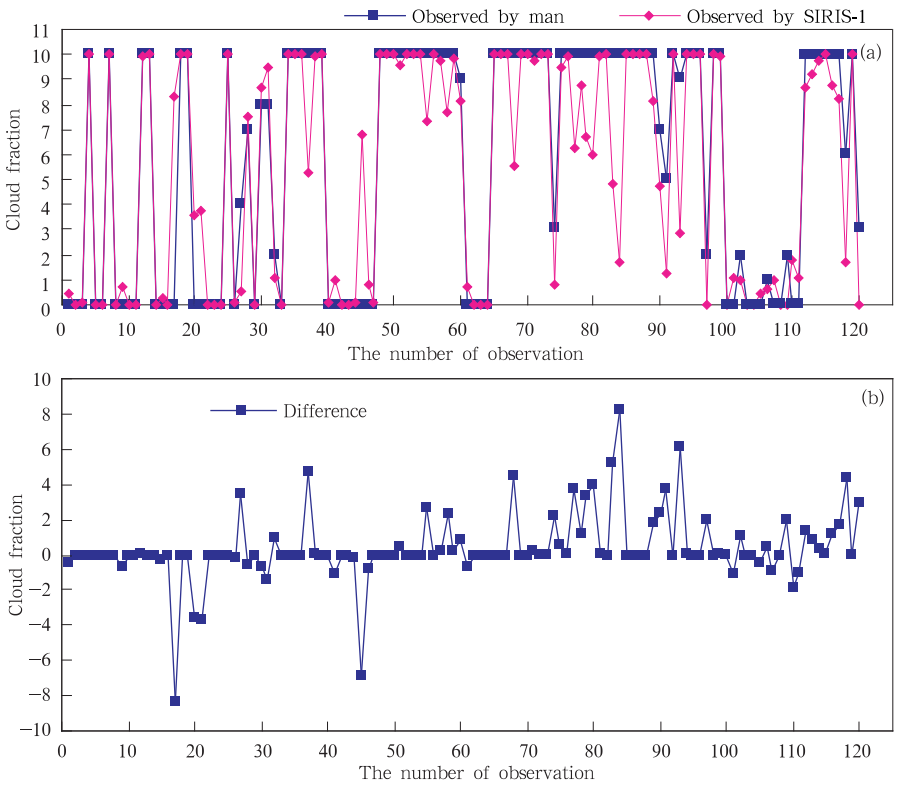


图7 非卷云天空情况下的器测和目测云量(a)及两者之差(b)

Fig. 7 Cloud covers (observed by SIRIS-1 and observed by man)(a) and their difference (b) under the sky conditions dominated by non-cirrus as are based on the corresponding time observation

4.1.1 目测云量为10成和无云时的情况

在天空为晴空和主要云状为非卷云情况的121个观测时次中,目测为0成的观测时次有42个,云量为10成的观测时次有27个。图8给出了这两种情况下,两者观测云量的差值。可以看到总体对比情况较好,大部分差值不到1成,目测为10成的情况有两个时刻的云量差值较大,无云的情况有4个观测时刻差值较大。说明对于晴空和云量为10的中低云(TB如图10中2007年5月8日12时30分—16时30分)来说是比较一致的。

分析目测云量为10成的情况中出现两次差值较大时的天空情况,共同点是第一种云状均为卷层云,同时能见度都不好,并且都是SIRIS-1观测云量偏少。第1个时刻是7月26日14时(图8a中A点),目测的云状为卷层云和高积云,云量为10成;第2个时刻是7月27日02时(图8a中B点),云状为卷层云。而7月26日4个时次目测的云状(云量)分别为卷云(10-),卷云(8),卷层云(10)和卷云(10-),能见度分别为4.0、2.5、5.0、6.0 km;7月27日4个时次的云状(云量)分别为卷层云(10),卷云(9),卷云(10-)和卷云(8),能见度分别为6.0、4.0、8.0、6.0 km,说明这两天的能见度都不好。图9a为7月26日全天TB的观测结果(7月27日的情况相似)。从图9a中可以看到除4—7时,TB较高,有低云外,大部分时间TB在-9℃左右,12—15时TB虽有较高的值出现,但在14时左右变化相对

较少。在 12 时可以看到 TB 值非常高的太阳亮点,可以判断云层很薄、透光。依次观察 7 月 26 日 13 时 30 分到 14 时之间 1 min 间隔的全天空照片,13 时 45 分全天空照片(图 9b)所示,天空为白色比较均匀,基本没有什么变化,可以看到太阳光点。又由于 TB 在低观测仰角处较高,能见度又低,与近地层有霾存在的观测结果一致,因而也不能排除霾的影响。

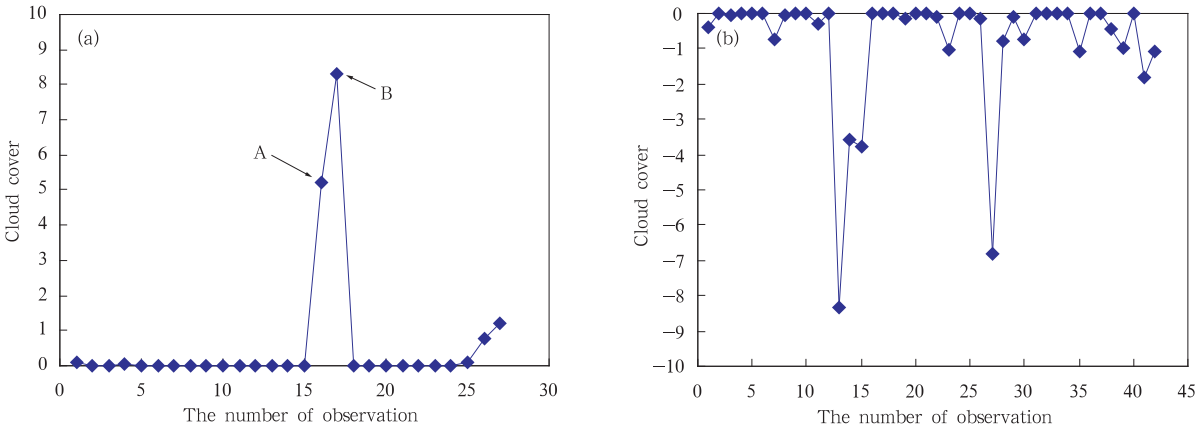


图 8 目测与器测的差值(a. 目测为 10 成,b. 目测为 0 成)

Fig. 8 Differences between observed by man and SIRIS-1 in the cases of (a) observed by man equal to 10 and (b) observed by man equal to 0

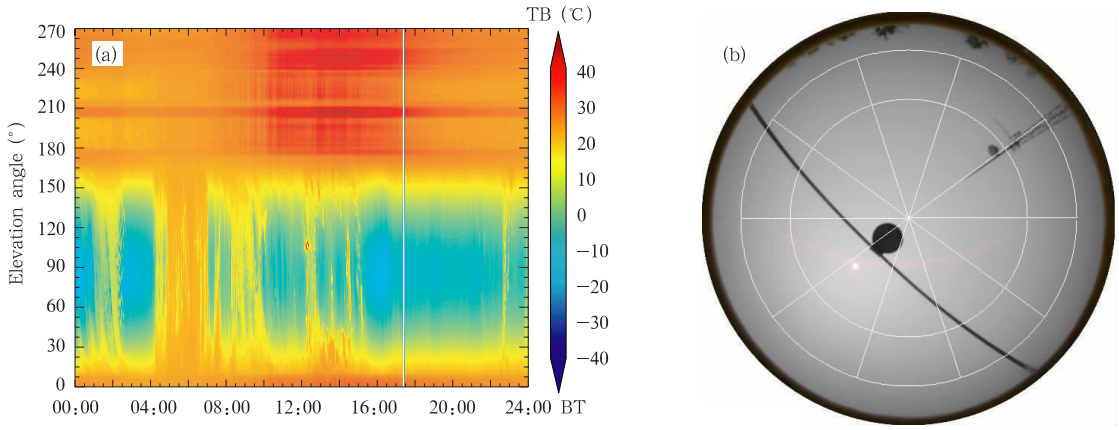


图 9 7 月 26 日全天观测的 TB 随时间的变化(a)和 7 月 26 日 13 时 45 时全天空照片(b)

Fig. 9 (a) TB observed on 26 July 2007 and (b) the whole sky photo at 13:45 BT on 26 July 2007 (b)

对于目测为无云的情况,从图 8b 中可以看到,虽然目测为 0,但是器测并不为 0,其中有 4 个观测时刻云量差值大于 3 成。第 1 个点为 5 月 8 日 02 时,云量差值约 8 成,此时气象站观测的能见度为 12 km;第 2、第 3 个点为 5 月 12 日 14 和 20 时,云量差值近 4 成,能见度均为 30 km;第 4 个点为 5 月 28 日 20 时,云量差值近 7 成,能见度 25 km。由于没有同时刻的可见光全天空照片,所以只能根据观测的 TB 来加以判断。

分析这 4 个时刻的 TB 图,以及这 4 个时刻前 30 分钟内 TB 随观测仰角变化的曲线,可以看到一个共同点,即每一条 TB 曲线都比较光滑,接近地平处 TB 随仰角变化较晴空时缓慢,每次同方向观测的 TB 基本没有什么变化。从 5 月 8 日 TB 观测值(图 10a)可以看到 02 时附近 TB 均匀,南北方向对称。从 5 月 8 日 02 时前 30 分钟的 TB 随观测仰角变化的曲线(图 10b,时间间隔约 10 min)可以看到,4 条线基本重合。这种天空均匀的情况可能是近地层霾的影响,也有可能是雾。由此看来,这 4 个观测时刻比较可能是霾层的影响,而不是天空有云,是云

判别算法不足,误判低仰角观测方向处有较高的云存在。

因此,就目前来说,试验观测所使用的仪器和云量反演算法对于观测高空透光的薄卷层云,以及将其与浓重的霾区分开来,还是非常困难的,这是两者云量差距较大的一个重要原因。如何较好地将高云和较浓重的气溶胶层区分开来还有待于进一步的研究。

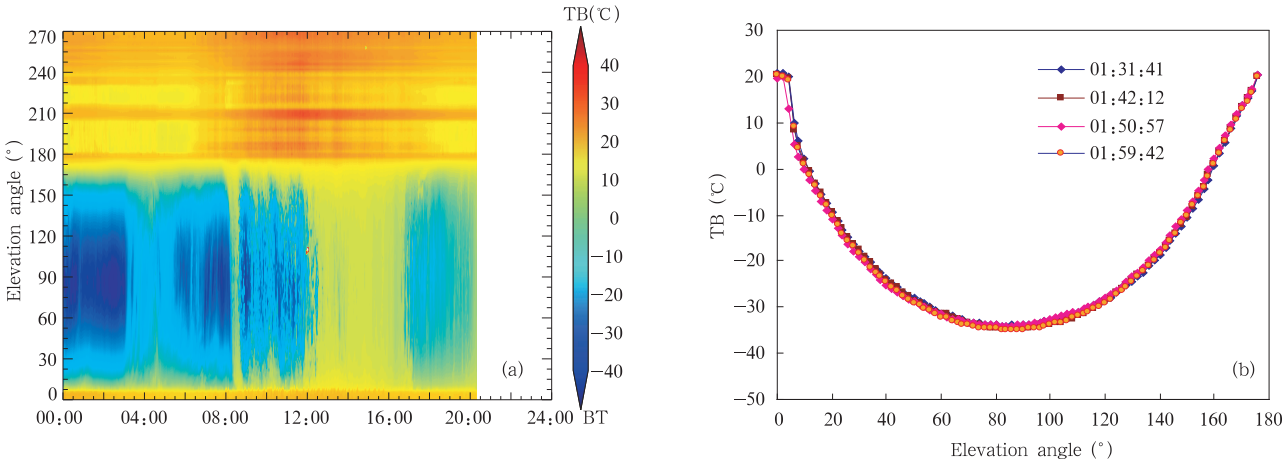


图 10 2007 年 5 月 8 日 TB 值随时间的变化和随观测仰角变化曲线
(a. 全天观测, b. 1 时 30 分到 2 时的 TB)
Fig. 10 TB observed on 8 May 2007
(a. TB of whole day and b. TB as a function of elevation angle from 01:30 to 02:00 BT)

4.1.2 目测云量为 10 - 的情况

这种情况器测和目测共有 35 个同时观测次数,其中有 18 次目测的第 2 种云状为卷云。这里令目测 10 - 为 10 成来计算两者云量差,从这 35 个观测时刻两者观测云量的差值(图 11a)可以看出,差值全部为正,说明这种情况器测均小于目测。图中云量差值大于 1 成的共有 11 个点,大于 3 成的有 5 个点,这 5 个点中有 3 个点目测的第 2 种云状为卷云。观察所有云量差值大于 1 成以上观测时刻的 TB 图,均可以看到 TB 值比晴空时高,而且时而高得较多,变化较大,说明这种情况天空中的云是变化的,有大量卷云,低云有时多,有时少,能见度较差,可能有霾存在。以 7 月 22 日 14 时为例,有同时的全天空照相可以对比。这一天目测都为 10 - ,14 时云状为积云,能见度为 15 km。图 11b 给出了 14 时的可见光全天空照片,天空为灰白色。从时间序列照片,可以看到 13 时 30 分天空中浓低云不多,大部分为稀薄的高云或霾,可以看到太阳亮点。13 时 45 分开始,天空中浓低云增多,看不到太阳;13 时 51 分浓低云开始减少,渐渐又可看到太阳。13 时 55 分之后,天空中的低云越来越少,高云或霾占大多数,太阳亮点较大。结合 7 月 22 日 TB 图(图 12a)可以看到,仰角 0°—180°天空范围内,多数为浅蓝色,亮温大约在 - 10℃左右,在 12 时可以看到太阳,说明这一天 TB 为 - 10℃时,天空中在通过天顶扫描线内的云层不厚(或是霾)。图中显示 12—16 时 TB 的变化较大,TB 较高的黄色部分较多。而刚好在 14 时附近,TB 高的部分(黄色部分)略有减少,说明低云减少,高云或霾为主要部分。这与可见光全天空照片的记录是一致的。图 12b 给出了 2007 年 7 月 22 日全天观测云量的对比图,蓝色点线为 SIRIS-1 每一次天空 TB 扫描测得的云量,有黄色点的红线为器测云量,粉色线为目测的 4 个时次云量,线上小方块上面给出了目测的云状。从图中可以看到 SIRIS-1 观测的时间分辨率较高,可以清楚地看到天空中云量的变化情况(有时高空薄卷云可能观测不到)。图中显示 14 时前半小时中天空云量变化较大,最大值时云量接近 10 成,14 时云量接近 2 成,此后云量又逐渐增多。这与全天空照片的情况是非常一致的。考虑到目测的时间段与器测不一致,而 14 时前半小时内天空云量又变化较快,因此 SIRIS-1 观测云量的平均值只有 6 成多,所以用 14 时的器测与目测云量(10 - 近似为 10 成)来进行比较,差别较大。而且目测为10 - 还有不确定的成分,具体这

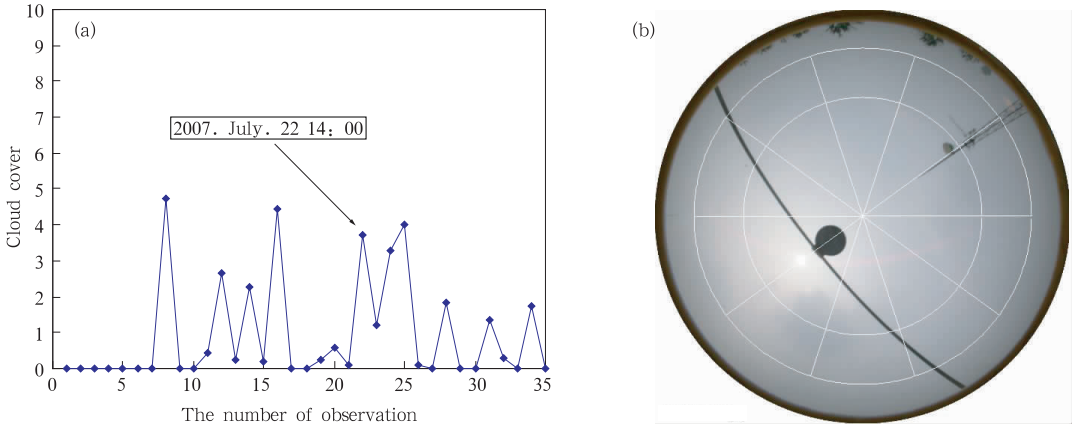


图 11 目测与器测云量的差值(目测为 10－的情况)(a)和
2007 年 7 月 22 日 14 时全天空照片(b)

Fig. 11 Differences between observed by man and SIRIS-1 when observed by man recorded as 10－ by human observer (a); whole sky photo at 14:00 BT on 22 July 2007 (b)

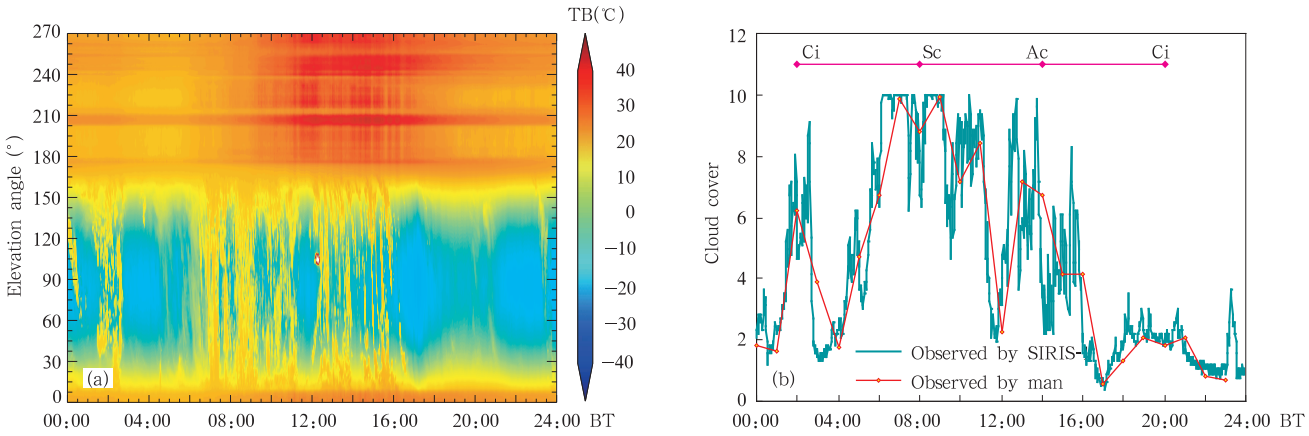


图 12 2007 年 7 月 22 日全天观测的 TB 随时间的变化(a)和云量对比(b)

Fig. 12 TB observed on 22 July 2007 (a) and the comparison of cloud covers (b)

种天气情况下卷云和霾究竟各占的比例是多少肉眼也很难确定。

4.1.3 目测云量为 1—9 成的情况

除去主要云状为卷云的情况,2007 年 4 月底至 8 月,目测云量为 1—9 成的情况比较少,两种观测共有 16 个共同观测时次。这种天气大多能见度较好,平均为 20 km。而且多数天空中多于 2 种云状。16 个观测时次中,仅 6 个时次天空中只有 1 种云状;4 个时次有 3 种云状;2 种以上云状的观测时刻,都有一种云状是卷云。从两种方式观测的云量差(图 13)可以看到,云量的绝对差值小于 1 成的只有 6 个点;大于 3 成的有 5 个点。从这些观测时刻的 TB 图可以看到 TB 值大都变化较大,说明天空中的云在不断地变化。对于云量差值小于 1 成的情况,有的是因为本身天空云量少,双方观测到的都少,所以差值小。如第一个点的观测时间是 8 月 13 日 20 时,目测云量为 1 成,器测云量为 0.6 成,所以云量差为 0.4 成。也有云量较大,差值较小的情况,其原因是目测整点前半个小时里,天空云量基本没有大的变化。至于云量差值的绝对值大于 1 成的情况,除极个别情况例外,大多是因为天空中云量变化较大的缘故,整点前半小时之内消散或者增多。云量差值大于 3 成的 5 个点均属这种情况,其云量和云状列于表 2。表中 8 月 1 日 08 时、29 日 08 时、30 日 08 时恰好有同时段的全天空照片可供对比。与第 3 节中方法相同,利用全天空照片估算了总云量和扫描红线所经南北部分的云量。图 14 给出的是 8 月 1 日和 29 日 06 时 30 分—08 时 30 分 SIRIS-1 观测

云量、利用照片估算的全天空云量和红线所经南北部分云量随时间的变化。表 2 中 8 月 1 日 08 时目测为 5 成,器测为 1.25 成。从图 14a 中可以看到 8 月 1 日仅在 07 时 15 分至 07 时 30 分的云量较多,后来减少,到 07 时 45 分后基本无云,全天空照片估算的云量与 SIRIS-1 观测云量的变化一致。而器测为 08 时前 30 分钟的平均值,所以相差较大。

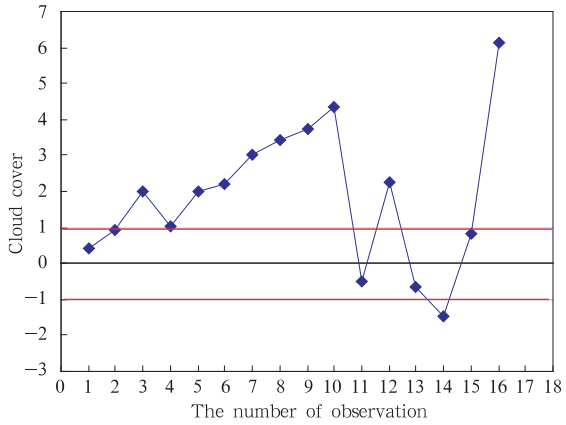


图 13 目测与器测云量的差值(当目测云量为 1—9 成时)

Fig. 13 Differences between observed by man and SIRIS-1 when 1－9 by human observer

表 2 中 8 月 29 日 8 时目测为 6 成,器测为1.67 成。从图14b中可以看到8月29日在7时15分之前天空云量较多,3 种方式计算的云量一致。照片显示天空中布满较厚的鳞状云。从时间序列照片可以看到 07 时 15 分以后云层逐渐从北方开始变薄。07 时 20 分可以看到南方云多,云层较厚,北方云层较薄,此时 SIRIS-1 观测云量为 9 成,与照片基本一致。07 时 30 分—8 时天空中云逐渐消散,从北方开始天空渐变为蓝色晴空;天顶周围云层稀薄;南方鳞状云层变薄,透过缝隙可以看到蓝天。在此期间 SIRIS-1 观测云量与全天空照片估算的云量变化趋势一致,但差值较大,原因是天空中有些部分云层很薄,加之透蓝天的鳞状云缝隙渐宽,当 SIRIS-1 观测方向指向蓝天的部分和云层很薄的部分被判定为晴空,而人工则将照片中这些部分均估算为云。08 时天空已经完全晴朗。

表 2 目测和器测的云量差值大于 3 成以上时的观测情况

Table 2 Instances with the differences between observed by man and SIRIS-1 over 3

观测日期	观测时间	目测云量(成)	目测云状	器测云量(成)
5 月 16 日	14:00	4	积云卷云	0.58
8 月 1 日	08:00	5	层积云卷云	1.25
8 月 2 日	14:00	9	积云卷云	2.87
8 月 29 日	08:00	6	高积云	1.67
8 月 30 日	08:00	3	高积云	0.00

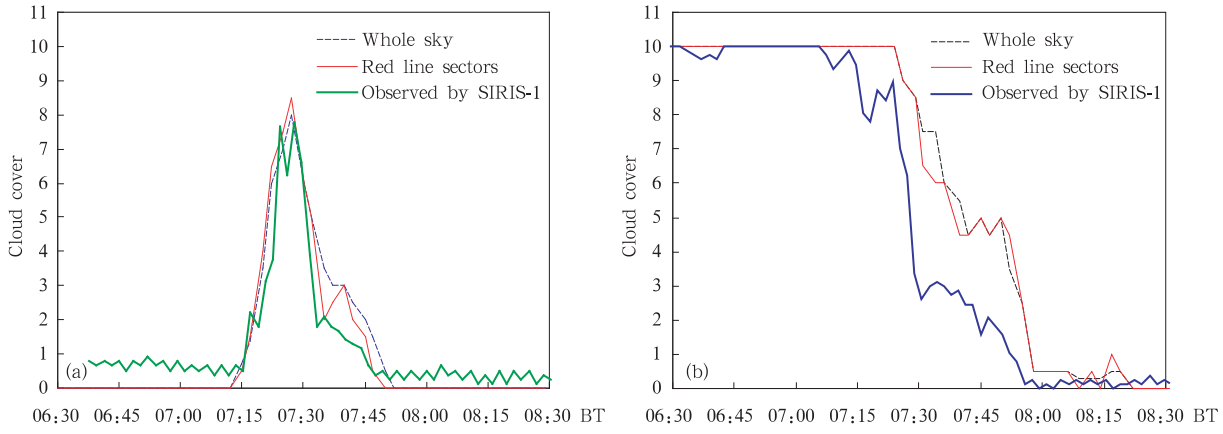


图 14 SIRIS-1 观测云量、据全天空照片估算的全天空云量和红线所经南北部分云量(a. 8 月 1 日 6 时 30 分－8 时 30 分,b. 8 月 29 日 6 时 30 分－8 时 30 分)

Fig. 14 Comparison of the cloud cover observed by the SIRIS-1, the cloud covers of whole sky and red line sectors estimated from the whole sky images during the time period of 06:30－08:30 BT on (a) 1 and (b) 29 August 2007

8 月 1 日和 29 日的情况可以说明,当天空中云变化较快时,SIRIS-1 观测与目测的时间和方法不同,是云量差距较大的原因。

另外,8 月 30 日 8 时,目测为 3 成,器测为 0。观察 8 月 30 日 TB 图和 8 时前 30 分钟之内全天空时间序列照片,都没有看到有云的信息。这是一个

例外的情况。

4.2 天空中主要云状为卷云的情况

2007 年 4 月至 8 月,当目测天空中主要云状为卷云时,目测和器测共有 181 次同时刻观测。两种云量差值的平均值为 4.28。总体来说,观测时刻的平均能见度为 16.27 km。图 15 给出的是两种云量的散点图(图中11代表目测为10 - 的情况)。从图中可以看到,两者的相关程度非常低,R^2 只有 0.1988。在这种情况下,目测成数最高为 9 和10 - ,没有云量为 10 成的情况。目测为 10 - 的情况共有 48 次,能见度平均值为 12.18 km,与器测差值的平均值为 5.12(这里是令云量 10 - 为 10 来计算的);目测为 1 - 9 成的共有 133 次,能见度平均值为 17.74 km。

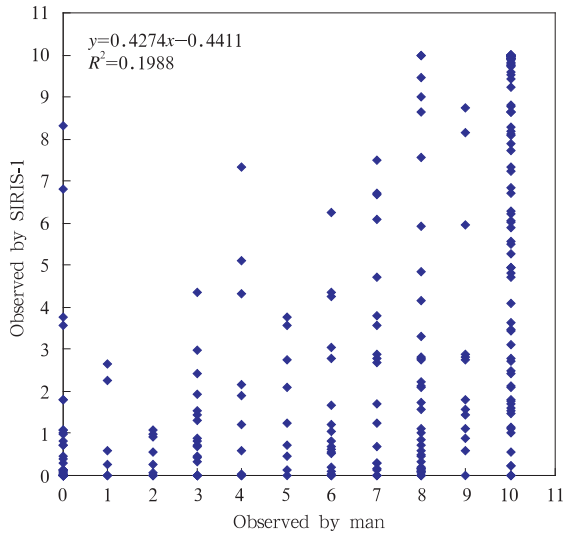


图 15 卷云为主要云状时目测和器测的散点图

Fig. 15 Scattered plot (Observed by man vs. Observed by SIRIS-1) under the sky conditions dominated by cirrus

通过对卷云情况逐个观察分析,总体大致可以分为 4 种情况:

(1) 对于较厚的,在目测整点前 30 分钟以内比较稳定的卷云,或者还有其他低云存在,器测与目测差距较小。如 2007 年 6 月 26 日 20 时目测云状为卷云,目测为 10 - ,能见度为 20 km,从这天观测的 TB(图 16a)可以看到,在 18—20 时左右,TB 较高,且比较均匀,说明云层较厚、并且变化不是很快,所以器测为 10 成,与目测一致。又如 7 月 29 日 14 时,目测云状为卷云和积云,目测为 10 - ;能见度为 8 km;全天空照片(图 17a)显示,看不到太阳,表明云层较厚。从全天观测的 TB (图 16b)可以看到 TB 在 14 时左右有的地方较高,桔黄色约 25℃左右,说明有中低云存在,有的地方略低,但是也在 10℃左右,说明卷云比较厚,再加上能见度不好,所以器测为 10 成,与气象站目测一致。

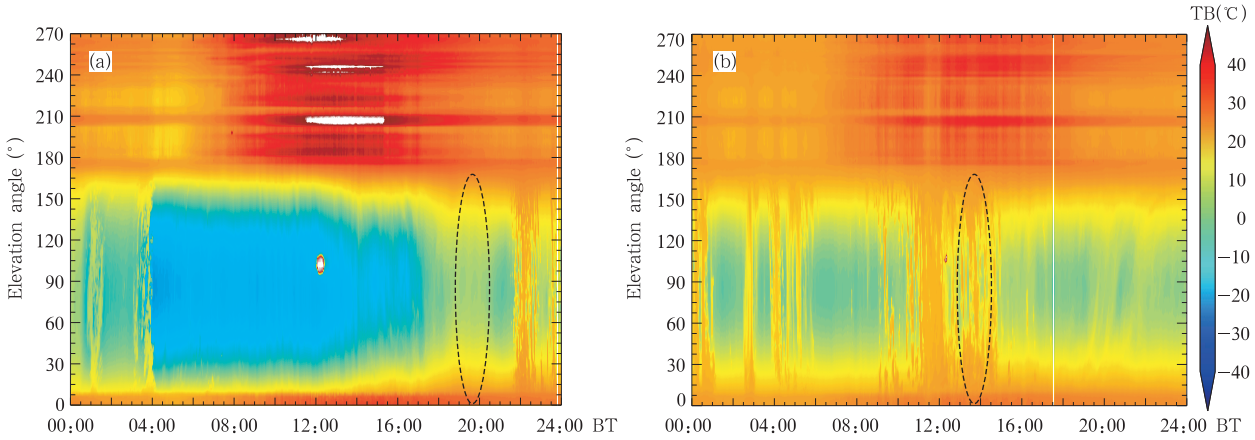


图 16 2007 年 6 月 26 日(a)和 29 日(b)全天观测的 TB 随时间的变化

Fig. 16 TB observed on 26 (a) and 29 (b) June 2007

(2) 对于天空透着蓝色,高空可能有卷云,同时霾较重能见度不是很好的天空,器测与目测云量的差别就比较大,如图 17b 给出的 2007 年 7 月 23 日 7 时 47 分的天空照片所示。7 月 23 日 8 时的目测云量为10 - ,观测时刻能见度为 8 km,而器测不到 2 成,差别很大。

(3) 对于能见度较好,天空呈现蓝色,高空除有薄卷云外,还有其他类型的云,同时云的变化较快,那么两者观测的云量差别也较大。如 2007 年 8 月 23 日 8 时,能见度为 15 km,云状为卷云和层积云,

目测为 10－。8 月 23 日 07 时 45 分的全天空照片(图 17c,7 时 30 分—8 时的系列照片均与其类似),可以看到云的变化很快。8 时器测为 3 成多,与目测差的很多,但是该时刻观测员目测的低云云量为 4 成,则与器测相差较少。

(4) 对于只有一种卷云的天空,如图 17d 给出的 5 月 10 日 7 时 45 分全天空照片,仔细观察 7 时 30—8 时的时间序列照片可以分辨出高空有非常薄的卷云。8 时目测为 7,而此时器测为 0。所以利用目前的红外传感器和反演方法还不能观测到这样天空中的薄卷云。

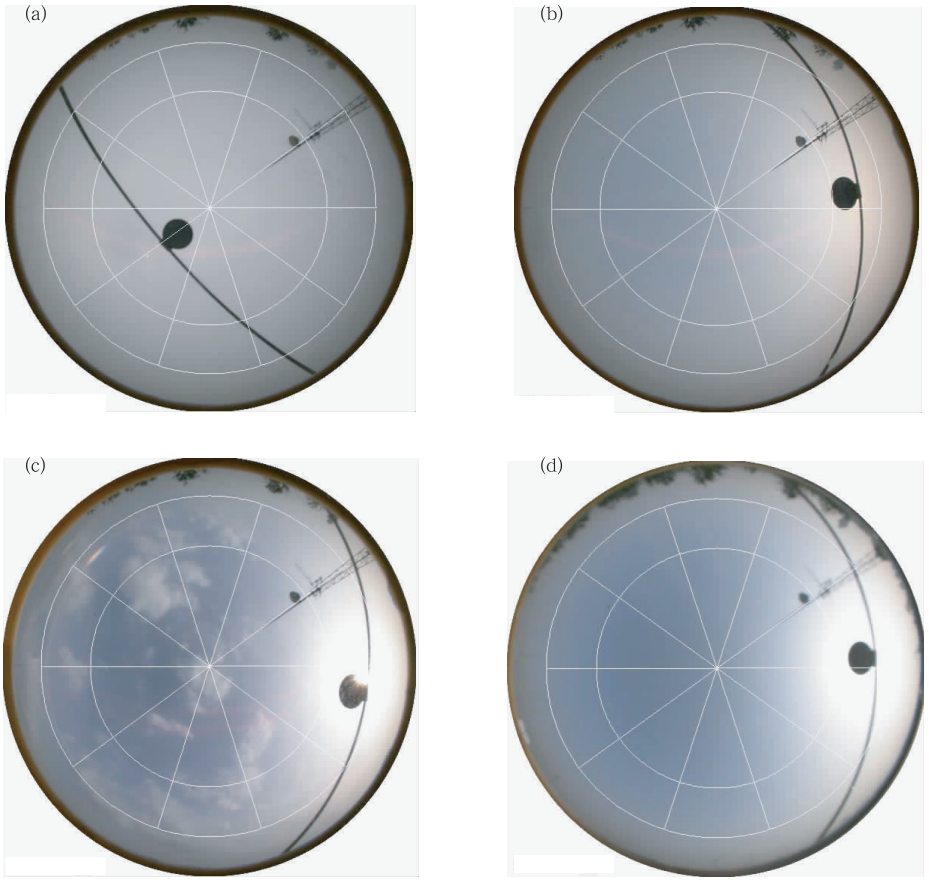


图 17 2007 年 7 月 29 日 14 时(a)、7 月 23 日 7 时 47 分(b)、8 月 23 日 7 时 45 分(c)和 5 月 10 日 7 时 45 分(d)全天空照片

Fig. 17 Whole sky photos at 14:00 BT 29 July (a), 07:47 BT 23 July (b), 07:45 BT 23 August (c) and 07:45 BT 10 May (d) 2007

5 结 论

本文介绍了中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室(LAGEO)自行研制的全自动扫描式天空红外亮温仪(SIRIS-1),以及使用该仪器在北京市气象局南郊观象台进行 TB 观测的情况,从所测得的 TB 图都可以清楚地看到,如果观测方向上是晴空,则亮温很低;如果观测方向有云出现,其亮温值就一定比晴空高,非常敏感,用于进行天空中云的监测是可行的。通过将利用测得的 TB 和当时的地面气象资料计算的天空云量与南郊观象台观测员目测的天空云量根据不同情况进行的对比分析表明:

(1) 目前观测使用的红外传感器和反演计算方法对于天空中的中低云或云层较厚的卷云进行云量观测比较适用,对于高空薄卷云的观测能力不足。

(2) 对于天空云状是以非卷云为主的情况,目测与器测是比较一致的。但是对于能见度较低,或是天空中的云变化较大的情况,两者观测的差别就

较大,其主要原因是①观测时间和观测方法不同;②对于近地层霾较重,能见度不好的情况,目视的可靠性较差;目前利用红外观测,对中低云可较准确识别,而对于很薄的高云和浓重的霾还很难明确区分,因此这一点还需要深入的探讨和研究。

(3) 仅采用对天空中从北到南线扫描的观测方式对天空进行云量观测,其时间的平均云量具有一定的代表性。但当云分布具有优势方向时,则会有较大误差。只有进行全天空扫描观测才能解决这个问题。

(4) 利用全自动扫描式天空红外亮温仪(SIRIS-1)来观测云量的优点是:全天候、全自动观测;时间分辨率高、观测时间准确;不受观测时刻光线条件的影响;由于云的红外辐射特性在白天和夜间相同,因此一套仪器、一个计算方法就可以用于全天候监测天空云量的发展变化。利用红外传感器进行全天空扫描观测,配合白天可见光全天空照相,将可以优势互补,准确的进行天空云量的量化,并且同时给出云量和云底高度的分布。

目前在中国科学院大气物理研究所实验楼楼顶,全天空 TB 扫描观测正在进行中,已经获得近一年的准连续资料。对观测仪器硬件和对云底高、云量的判断、计算和显示软件正在不断进行更新和完善之中。目前红外传感器的低温测量范围已扩展到 -100℃;硬件设备增加了温度和湿度传感器,可以实时获得地面空气温度和湿度;软件方面增加了云底高度和云量的实时计算,当每次完成全天空 TB 扫描以后,就可以用测得的 TB 和同时刻的地面温度和湿度计算得到云底高度分布和云量,并实时显示,同时显示的还有一天中温、湿度和云量随时间的变化情况。对于已经获得的全天空 TB 观测资料进行分析处理,进一步提高云底高度和云量的计算精度,并增加气溶胶的订正等,以及进一步将天空中云高和云量的计算范围扩大至低仰角部分等等,这些都是下一步的工作。

致谢:感谢北京市气象局南郊观象台为天空红外亮温观测提供试验场地,感谢提供北京 54511 地面站气象观测数据,并特别向观测人员表示衷心的感谢。

参考文献

霍娟,吕达仁. 2002. 全天空数字相机观测云量的初步研究. 南京气象学院学报, 25(2): 242-246

刘洪利,朱文琴,宜树华等. 2003. 中国地区云的气候特征分析. 气象学报, 61(4): 466-475

吕达仁, 王普才, 邱金桓等. 2003. 大气遥感与卫星气象学研究的进展与回顾. 大气科学, 27(4): 552-566

王可丽, 江灏,陈世强. 2001. 青藏高原地区的总云量-地面观测、卫星反演和同化资料的对比分析. 高原气象, 20(3): 252-257

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的模拟研究. 地球物理学报,50(2): 354-363

《地面气象观测规范》, 中华人民共和国气象行业标准 QX/T 46-2007,第 2 部分:云的观测

Bagtasa G, Liu C, Takeuchi N, et al. 2007. Dual-site lidar observations and satellite data analysis for regional cloud characterization. Optical Rev, 14(1): 39-47

Durr B, Philipona R. 2004. Automatic cloud amount detection by surface longwave downward radiation measurements. J Geophy Res-Atmos, 109: D5201

Kassianov E, Long C. N, Ovtchinnikov M. 2005. Cloud sky cover versus cloud fraction: whole-sky simulations and observations. J Appl Meteor, 44: 86-98

Li Z, Peng L, Wang J, et al. 2006. New definition and new calculation method of effective average cloud amount. Atmos Environ, 40: 4491-4500

Mallama A, Degnan J J. 2002. A thermal infrared cloud-mapping instrument for observatories. The Astronomical Society of the Pacific, 114: 913-917

Martins F R, Souza M P, Pereira E B. 2003. Comparative study of satellite and ground techniques for cloud cover determination. Adv Space Res, 32(11): 2275-2280

McCarthy M P, Hernandez G, Mactutis A, et al. 2007. Validation of an 8 - 14 μm cloud monitor using visual observations of antarctic cloud cover. Appl Optics, 46 (11): 2091-2098

Pfister G, Mckenxie 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: 1421-1434

Rossow W B, Schifer R A. 1991. ISCCP cloud data products. Bull Amer Meteor Soc, 72: 2-20

Shaw J A, Thurairajah B, Mizutani K. 2004. Cloud statistics measured with a ground-based Infrared Cloud Imager. Geoscience Remote Sens Symposium, 2004. IGARSS ´04. Proceedings. 2004 IEEE International, 3: 1976-1979

Stemphens G L. 2005. Cloud feedbacks in the climate system: A critical review. J Climate, 18: 237-272