

姚安天文观测站的夜间红外云量特征分析*

樊亮^{1,2,3†} 雷成明^{1,2‡} 师冬冬¹ 黄学海^{1,2}

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210008)

(2 中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室 南京 210008)

(3 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 云对天文观测具有重要影响,云量是衡量天文台址质量的重要指标.位于姚安天文观测站的红外云量仪,用于获取实时的全天高空间分辨率云图.结合空间碎片的实际观测,严格按照天文夜对累积1 yr (2015-08-01—2016-07-31)的夜间云量数据进行统计和分析.姚安站的年平均夜间云量为4.42成,年天文可用夜为236个,其中测光夜98个,半测光夜44个,光谱夜94个.云量具有明显的两季特征:5月至10月间为雨季,云量显著增多,其中7月份观测条件最差;11月至次年4月为旱季,云量较少,每月的天文可用夜均在23个以上,其中1月份的测光夜最多,3月份的天文可用夜最多.结合云层对天文观测的威胁程度,统计不同云量的总时间和每月的云量分布情况,评估观测站的气象条件,为合理安排观测计划提供参考.

关键词 天体测量, 仪器: 红外云量仪, 望远镜, 技术: 图像处理, 方法: 观测, 数据分析
中图分类号: P112; **文献标识码:** A

1 引言

中国科学院紫金山天文台姚安天文观测站是中国科学院空间目标与碎片观测网的重要组成部分,主要用于空间碎片的地基光学监测^[1].姚安站位于云南省中北部的姚安县,海拔高2020 m,属于北亚热带冬干夏湿季风气候区,其总趋势为冬春干旱,夏秋阴雨.

云作为一种常见的天气现象,是由大气中水汽凝结成的水滴、冰晶或由它们的混合物组成的漂浮可见聚合物.云的分布和变化标志着大气的运动状况,是短期天气变化的重要征兆.云的分布具有典型的区域性和季节性特征,对地面光学和红外天文观测有重要影响,云量是衡量天文台址质量的重要指标之一.

2016-08-04收到原稿, 2016-08-26收到修改稿

*中国科学院国防科技创新基金项目(CXJJ-14-S106)资助

†fanliang@pmo.ac.cn

‡cmlei@pmo.ac.cn

位于姚安站的红外云量仪, 是一种大视场云层定位的光电测量系统, 用于实时监测观测站的日常云量变化情况^[2-3]. 红外云量仪相比气象卫星, 获得的云图具有较高的空间分辨率, 能准确反映观测站当地的实际云量分布和变化情况. 我们通过对累积1 yr的夜间云量数据进行统计和分析, 能有效评估观测站的气象条件, 研究云量的四季分布情况, 为合理安排天文观测计划提供指导, 提高地基光电望远镜的工作效率.

2 云图采集与处理

2.1 云图采集

姚安天文观测站的红外云量仪是一种非制冷面阵列式红外测云系统, 利用大气向下红外辐射进行云层测量. 系统采用凸面反射镜及校正镜的大视场光学系统, 来自空间8-12 μm 的红外辐射经反射镜反射后, 以较小的视场进入透视成像系统, 实现云图的大视场空间成像, 覆盖方位角 0° - 360° 和仰角 15° - 90° 的天区, 能够进行昼夜连续观测. 由于云层越厚, 对应的红外辐射也越强, 即使在没有月亮的夜晚, 红外测云也能清晰地分辨云层的分布, 具有可靠性高、环境适应性强的特性^[4-5]. 云量仪进行方位等参数的定标后, 放置于四周没有建筑物等遮挡的楼顶, 进行全天候的图像采集. 云量仪输出的原始图像为灰度图, 设置云图的输出频率为1帧/分钟.

为了与实际的天文观测计划相关联, 需详细研究夜间云量的特征, 我们引入天文夜的概念. 在天文学上, 太阳从东边升起时, 视圆面的上边缘与地平线相切的时刻被定义为日出时刻; 太阳从西边下落时, 太阳视圆面的上边缘与地平线相切的时刻被定义为日落时刻. 当太阳在地平线以下时, 并不意味着天空就进入了黑暗状态, 由于大气折射, 地面上方的大气仍然受到太阳光的照射并将太阳光散射到四面八方, 此时还不适合天文观测, 天文学上把这段时间称为曙暮光. 天文曙暮光是指日出或日落时刻到太阳在地平线以下 18° 的一段时间, 当太阳高度降至地平线以下 18° 时, 人眼可见6等星^[6]. 可以通过太阳高度计算曙暮光时间. 设太阳高度角为 h_\odot , 则有:

$$\sin h_\odot = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos t, \quad (1)$$

式中 φ 为当地纬度, δ 为太阳赤纬, t 为时角. 以 $h_\odot = 0^\circ, -18^\circ$ 分别代入上式即可计算出各地曙暮光开始或终止的时间. 经过计算, 姚安站2015年冬至日的曙光、暮光持续时间均为1 h 34 min, 对同一地点曙暮光的持续时间全年差别仅为几分钟. 对于空间碎片观测, 不需要等到暮光完全结束才能观测, 结合实际的观测经验, 我们统一设置日落后40 min到日出前40 min为天文夜, 姚安站的日出、日落时间可以直接在国家授时中心查询. 采集1 yr的夜间云量数据进行分析, 时间范围从北京时间的2015年8月1日到2016年7月31日, 其中2015年8月1日姚安站的日落时间为20:01, 8月2日的日出时间为06:42, 则天文夜时间为20:41—06:02, 夜长9 h 21 min.

2.2 云图处理

在采集的原始云图中, 云量仪本身的机械支撑结构会产生遮挡, 由于支架区域固定, 云层的连续性较强, 利用邻近像素点对图像进行修复, 通过双线性插值算法来去除支撑支架的遮挡.

云量仪在设计时已经实测标定了云层分类的标准, 但在实际的红外云图处理中, 对

不同季节统一采用固定阈值法对云层分类可能存在较大误差. 由于水汽在8–12 μm 波段的弱吸收作用, 大气晴空的红外阈值具有明显的季节变化和同季节的昼夜相似性, 因此选择基于晴空阈值法的云层分类方法更为可靠. 为减少由于样本时间跨度过大导致晴空阈值变化范围大而不具有季节代表性, 因此按月选取晴空样本并统计晴空阈值^[7]. 然后根据晴空阈值, 将云图二值化, 得到黑白云图, 其中黑色的像素点表征晴空, 白色的像素点表征云层. 原始红外云图和经过处理的二值化云图如图1所示, 其中圆圈内部为有效的云图区域, 圆圈的边界即为15°仰角处.

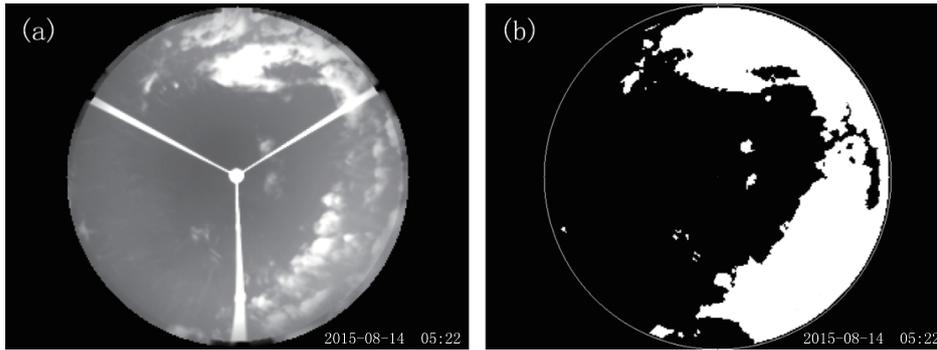


图1 云图. (a)原始红外云图, (b)二值化云图

Fig.1 The cloud image. (a) Original infrared cloud image, (b) binarized cloud image

3 云量特征分析

3.1 夜间云量

沿用气象部门的标准, 云量定义为云遮蔽天空视野的成数^[8]. 对于天文观测, 更关注夜晚的云量分布情况, 根据云量的多少和云层的薄厚特征来评估云对望远镜观测的威胁程度^[9–10]. 即使是薄云, 对望远镜观测也存在干扰, 在云图的二值化中直接区分了晴空与云层区域, 其中白色即为不可观测区域, 因此这里不再考虑云层的厚度问题.

对于单幅云图, 云量 f 用下式进行计算:

$$f = \frac{N_{\text{cloud}}}{N_{\text{total}}} \times 10 = \frac{N_{\text{cloud}}}{N_{\text{cloud}} + N_{\text{clean}}} \times 10, \quad (2)$$

式中, N_{total} 表示云图中有效区域(即实际天区)的像素个数, N_{cloud} 表示有效区域中云层的像素个数, N_{clean} 表示晴空的像素个数.

结合实际的观测经验, 云层对天文观测的威胁程度可按照表1进行判断^[11].

表1 云层威胁程度

Table 1 The threat levels of cloud				
$f/(10\%)$	0	0–3	3–7	7–10
Threat	none	little	medium	great
Equipment action	none	none	pause	turn off

按照之前设定的天文夜, 云图采集频率为1帧/分钟, 进行云量统计后取成数的平均值作为夜间云量. 如图2所示为4个典型夜晚的云量走势图, 图中均为北京时间.

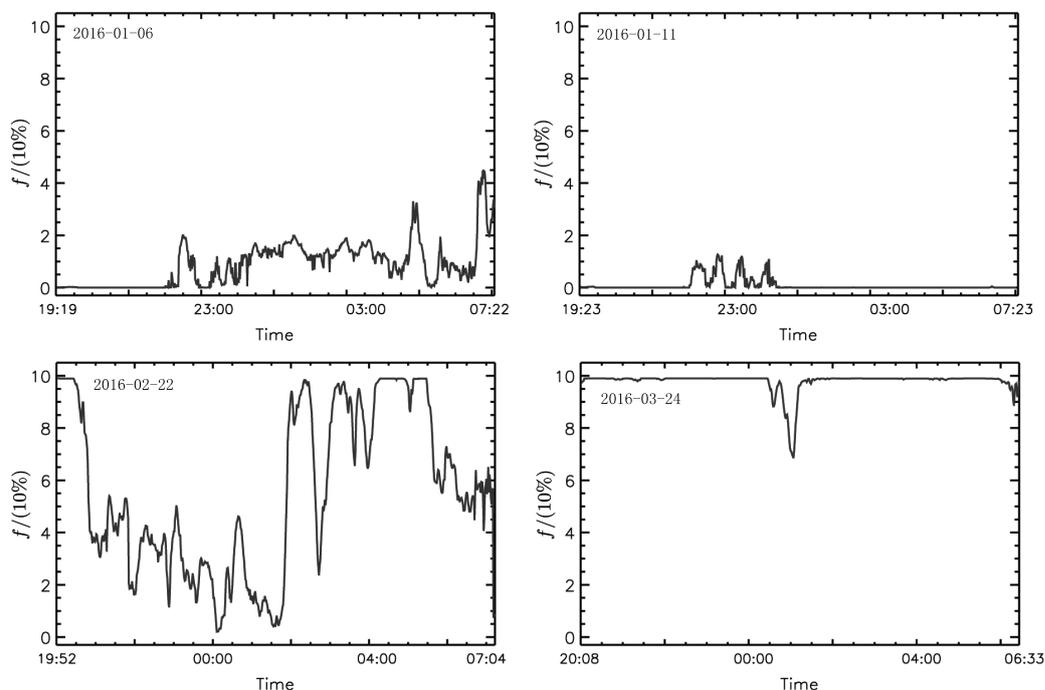


图 2 夜间云量走势图

Fig. 2 The trend chart of cloud cover at night

为了更直观地描述观测站的气象条件, 天文可用时间参考高美古天文选址观测资料处理中的定义, 引入测光夜、半测光夜和光谱夜的概念^[12-13], 如下:

测光夜: 连续6 h以上云量 $f = 0$ 的天文夜.

半测光夜: 连续3 h以上、不足6 h、云量 $f = 0$ 的天文夜.

光谱夜: 连续2 h云量 $f \leq 3$ 或连续1 h云量 $f = 0$ 和1 h云量 $f \leq 3$ 的天文夜.

天文可用夜: 指测光夜、半测光夜或光谱夜.

2016年1月6日的夜间云量为0.88成, 实时的云量变化显示22:20以前全天无云(即云量为0成), 是最理想的观测条件. 整夜的实时云量基本都在3成以下, 对观测威胁很小, 属于半测光夜. 1月11日的夜间云量为0.09成, 整夜基本全天无云, 是观测条件非常好的测光夜. 2月22日的夜间云量达到了5.6成, 实时云量起伏较大, 在晚上21:00到次日2:00间云量较少, 可以认为是光谱夜. 3月24日为多云转小雨的天气, 夜间云量为9.8成, 完全不能观测. 夜间云量是一个平均值, 并不能很好地反映云量随时间分布的特征, 对于天文观测, 我们更关心的是每晚有多少时间是适合望远镜观测的. 因此需要结合表1对云量按照区间分布进行统计, 例如2月22日, 夜间的实时云量处于0-3成的时间为173 min, 处于3-7成的时间为256 min, 处于7-10成的时间为244 min.

3.2 云量特征

图3为不同云量的总时间统计图, 其中横坐标的0代表云量 $f = 0$, 1代表 $0 < f \leq 1$, ..., 10代表 $9 < f \leq 10$. 通过图3可以看出姚安站在1 yr时间里不同云量的总时间分布情况, 云量 $f = 0$ 的时间最多, 达到了1080 h, $8 < f \leq 10$ 之间的云量相对较多, 介于两者中间的云量很少, 处于天气的过渡状态, $5 < f \leq 6$ 仅占56 h, 持续时间很短.

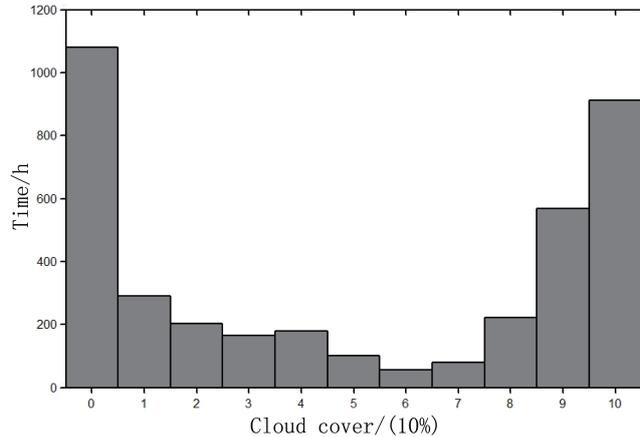


图3 不同云量的总时间统计图

Fig. 3 The total time cartogram of different cloud cover

图4为姚安站2015-08-01—2016-07-31期间共12个月的夜间云量分布图, 依据表1中划分的云层威胁程度对每个月的夜间云量进行分段统计, 其中柱状图的黑色部分代表每月夜间云量 $f \leq 3$ 的总时间, 白色部分代表 $3 < f < 7$ 的总时间, 灰色部分代表云量 $f \geq 7$ 的总时间. 北半球夏至日的天文夜最短, 冬至日的天文夜最长, 各月的天数存在差异, 因此1 yr中各月的天文夜总时间的变化趋势不是平滑的. 表2为1 yr的天文可用夜(Available night)统计表, 包括测光夜(Photometric night)、半测光夜(Half-photometric night)、光谱夜(Spectroscopic night).

结合图4和表2的数据, 可以对每个月的夜间云量分布情况做详细的分析. 数据显示5月至10月的云量明显偏多, 且存在较多夜间云量为10成的夜晚, 应该是阴雨天气居多, 其中7月份的观测条件最差, 仅有4天可以观测. 11月至次年4月的云量相对较少, 每月天文可用夜均在23 d以上, 天文观测时间显著增多. 11月至次年3月间, 每月测光夜均在11 d以上, 其中1月份的测光夜数最多, 达到了19个. 在1、2月份存在较多夜间云量为0成的夜晚, 其中1月份的19个测光夜的夜间云量基本均为0成, 观测条件非常好, 而3月份是天文可用夜数最多的月份, 达到了30个.

姚安站的年平均夜间云量为4.42成, 年天文可用夜为236个, 其中测光夜98个, 约占全年的27%, 半测光夜44个, 光谱夜94个. 而坐落于美国夏威夷群岛, 海拔4200 m的莫纳克亚山, 是世界公认的最佳天文台址之一, 其年平均云量约为2成, 年天文可用夜约为280个, 其中测光夜约为204个, 约占全年的56%^[14].

3.3 地理气候

姚安县位于云南省中北部, 楚雄彝族自治州西北部, 姚安天文观测站坐落于姚安县

西湖岭, 海拔高2020 m. 姚安属于北亚热带冬干夏湿季风气候区, 其总趋势为冬春干旱, 夏秋阴雨, 四季温和. 根据气象部门测定的数据, 1 yr之内, 干湿二季界限分明, 11月至次年4月为干季, 降雨量占全年9%; 5至10月为雨季, 降雨量占全年91%. 查阅国内一些关于云量分布和变化特征的研究, 一致认为云量与气温成负相关, 与降水成正相关^[15].

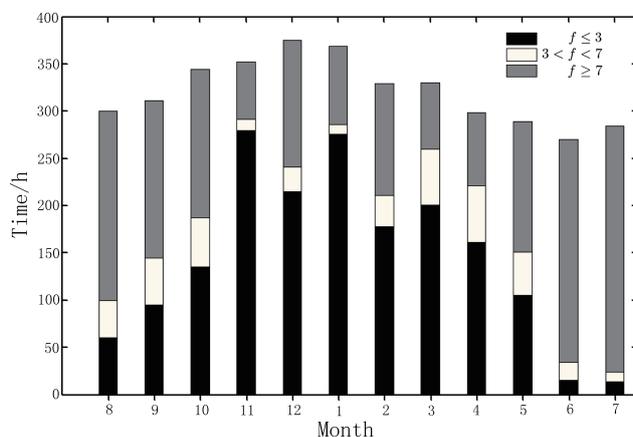


图 4 每月夜间云量分布图

Fig. 4 The distribution of cloud cover at night in each month

表 2 天文可用夜统计表

Table 2 The statistical table of available astronomy nights

Date	Available night	Photometric night	Half-photometric night	Spectroscopic night
2015-08	12	2	3	7
2015-09	14	3	4	7
2015-10	17	8	4	5
2015-11	28	15	6	7
2015-12	25	12	2	11
2016-01	26	19	1	6
2016-02	23	11	2	10
2016-03	30	14	7	9
2016-04	26	7	7	12
2016-05	19	5	6	8
2016-06	12	1	1	10
2016-07	4	1	1	2
Total	236	98	44	94

在云南地区的天文选址过程中, 利用极轨气象卫星资料计算云南地区的云量, 结果显示姚安处于相对少云带的地区. 1994年, 李晓明等^[16]利用卫星云图对云南天文观测台址进行筛选, 结果显示姚安地区年平均夜间云量小于3成的夜晚为251个, 测光夜为124个. 由于卫星测云与地面测云存在一定的差异, 此结果仅是对地面测云的估计. 在云南省域内对夜间光学人卫观测站址初选时^[17], 利用各气象站累积23 yr的云量观测资料进行分析, 每天3次(08:00、14:00、20:00)观测数据采样, 结果显示姚安地区年平均云量为5.5成, 总云量小于2成的年平均天数为87 d, 总云量大于8成的年平均天数为123 d. 数据是对白天和夜晚全天时的云量估算, 由于每天仅采样3个时间点的云量数据, 误差较大, 且数据显示白天云量比夜间云量多. 红外云量仪适用于地面定点云量观测, 相比气象卫星测定的云量数据具有更高的空间分辨率. 红外云量仪的采样频率为1帧/分钟, 相比传统气象云量的低采样频率, 能够准确地计算实时云量. 云在可见光波段与红外波段中表现出细微的特性差异^[18], 可见光云量和红外云量的差别很小, 可以忽略. 结合实际的观测经验, 云量的日变化较为剧烈, 月变化较为稳定, 且存在年际变化, 2016年5月至7月间的雨量较往年更多, 云量偏多, 天文可用夜较往年也相对更少.

天文站址的选定, 还要综合考虑大气透明度和防止污染等诸多因素, 实际方案是针对多方面的权衡, 云量是最重要的指标之一. 人卫观测最重要的是轨道弧段覆盖率, 对晴天数的要求放在第1位, 其次为夜天光和视宁度. 姚安天文观测站作为优良的人卫站址, 不仅适合空间碎片的地基观测, 也可作为恒星物理站的候选点.

4 结论与展望

云量作为衡量天文台址质量的重要指标, 对天文观测具有重要影响. 结合空间碎片的实际观测, 严格按照天文夜对累积1 yr (2015-08-01—2016-07-31)的夜间云量数据进行统计和分析, 研究姚安天文观测站的气象特征. 结果显示姚安站的年平均夜间云量为4.42成, 年天文可用夜为236个, 其中测光夜98个, 半测光夜44个, 光谱夜94个. 云量具有明显的两季特征: 5月至10月间为雨季, 云量显著增多, 其中7月份观测条件最差; 11月至次年4月为旱季, 云量较少, 每月的天文可用夜均在23个以上, 其中1月份的测光夜最多, 达到19个, 3月份的天文可用夜最多, 达到30个.

本文通过对累积1 yr的夜间云量数据进行统计与分析, 能够详细了解月云量特征的变化与趋势, 但对于不同年份之间可能存在年际变化, 因此需要积累更多的云量数据进行研究. 红外云量仪适用于地面定点云量观测, 具有比卫星测云更高的空间分辨率和极高的采样频率, 能够准确反映观测站当地的实际云量分布和变化情况, 可用于天文选址的定点评估, 以及为合理安排天文观测计划提供指导, 有效提高地基光电望远镜的工作效率.

参 考 文 献

- [1] Schildknecht T. A&ARv, 2007, 14: 41
- [2] 王昊京, 王建立, 王鸣浩, 等. 光学精密工程, 2010, 18: 1722
- [3] 刘美琪, 王昊京. 飞行器测控学报, 2011, 30: 43
- [4] Thurairajah B, Shaw J A. ITGRS, 2005, 43: 2000
- [5] Takato N, Okada N, Kosugi G, et al. Proceedings of SPIE, 2003, 4837: 872

- [6] 吴树森, 桂翰林, 吴淑琴. 黑龙江气象, 2011, 28: 25
- [7] 陈磊, 韩燕, 秦方强, 等. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9: 50
- [8] 钱璇, 姚永强, 张永倩. 天文学报, 2012, 53: 426
- [9] 尹佳, 姚永强, 王红帅, 等. 天文学报, 2012, 53: 230
- [10] Yin J, Yao Y Q, Wang H S, et al. ChA&A, 2012, 36: 457
- [11] 樊亮, 雷成明. 天文学报, 2016, 57: 461
- [12] 张柏荣, 于建明, 谭徽松. 天文研究与技术, 1996, S1: 1
- [13] 马开全, 于建明, 刘子忠, 等. 天文研究与技术, 1999, 2: 67
- [14] Morrison D, Murphy R E, Cruikshank D P, et al. PASP, 1973, 85: 255
- [15] 刘洪利, 朱文琴, 宜树华, 等. 气象学报, 2003, 61: 466
- [16] 李晓明, 谢光中, 李开华, 等. 天文研究与技术, 1994, 1: 1
- [17] 缪元兴. 天文研究与技术, 2007, 4: 86
- [18] 胡树贞, 马舒庆, 陶法, 等. 应用气象学报, 2012, 23: 441

Analysis of Nighttime Infrared Cloud Cover at Yaoan Astronomical Station

FAN Liang^{1,2,3} LEI Cheng-ming^{1,2} SHI Dong-dong¹ HUANG Xue-hai^{1,2}

(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(2 Key Laboratory for Space Object and Debris Observation, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT Clouds have important effects on astronomical observations. Cloud cover is an important indicator of the quality of an astronomical site. The infrared cloud imager which locates in Yaoan astronomical station, is used for the real-time acquisition of all-sky infrared cloud image with high spatial resolution. Combining the actual observations of space debris, according to astronomical nights strictly, we make statistics and analysis of cloud cover at night accumulated in one year (from 2015-08-01 to 2016-07-31). Annual average cloud cover at night at Yaoan astronomical station is 4.42 ten percent, and there are 236 available astronomy nights, including 98 photometric nights, 44 half-photometric nights, and 94 spectroscopic nights. The cloud cover has obvious characteristics of two seasons: the rainy season with a significant increase in cloud cover is from May to October, and the observation conditions are worst in July; The dry season is from November to April with low cloud cover, there are more than 23 available astronomy nights monthly, the most numerous photometric nights are in January, and the most available astronomy nights are in March. Combined with the threat level of cloud for astronomical observation, we make statistics of the total time of different cloud covers and the monthly distribution of cloud covers, to assess the meteorological conditions of the station, and to provide a reference for reasonable arrangements of the astronomical observations.

Key words astrometry, instrumentation: infrared cloud imager, telescopes, techniques: image processing, methods: observational, data analysis