

丽江与纳木错天光背景亮度在一天中的不同变化过程*

刘强^{1,2} 刘煜^{2,3†} 宋腾飞³ 任安炳¹ 赵明宇³ 张雪飞³ 李小波³ 祝凤荣²
沙飞扬^{2,3} OLOKETUYI Jacob Oladeji² 王新建² 段晓梅² 罗启旺²

(1 西华师范大学物理与天文学院 南充 634702)

(2 西南交通大学物理科学与技术学院 成都 611756)

(3 中国科学院云南天文台 昆明 650011)

摘要 天光背景是评价一个日冕观测站是否优秀的重要参数,这直接决定日冕仪能否实现对日冕活动的长期监测.日冕光度计(Sky Brightness Monitor, SBM)是一款精确测量白日天光背景、大气积分水汽含量、大气消光指数等重要大气参数的精密仪器,它也是日冕仪选址的国际通用仪器、中国西部太阳选址的重要设备.在利用纳木错观测点和丽江观测站累计的数据统计分析之前,先对两组代表性数据进行了深入分析,希望基于代表性数据的时间轮廓来初步研究和掌握址点的天光背景特性.首先通过实际气候特点和归算天光背景两方面,逐步解释天光背景在一天中的不同变化过程;其次建立一种有效的计算方法来衡量揭示一个台址的日冕亮度演化特性.两个址点的结果表明:(1)海拔3200 m的丽江站与海拔4700 m的纳木错观测点天光背景(530 nm)均较好,最小值均能达到 10×10^{-6} 量级,可以保障日冕常规观测;(2)纳木错观测点和丽江观测站天空背景亮度随时间演化的不同.丽江观测站不适合全天观测,上午观测条件远优于下午观测条件.而纳木错观测点的可观测时间长(从9:00至16:00),配合其他台站的观测设备可以显著提高空间天气的地面监测效率.结果分析不仅为后续统计纳木错的天光背景提供分析样例,同时也展示了纳木错天光背景的预期特征.

关键词 望远镜; 选址, 天文仪器, 方法: 数据分析, 技术: 图像处理

中图分类号: P141; **文献标识码**: A

1 引言

日冕是太阳的最外层大气,主要由高温、稀薄、高度电离的等离子体组成,温度高达百万摄氏度^[1].日冕物质抛射是太阳大气中最猛烈的爆发现象之一,也是灾害性空间天气事件的重要来源.日冕物质抛射会使低日冕中的物质瞬间向外膨胀并抛射,传播到近地空间时通常会扰动地球磁场,导致地磁暴、电离层暴和极光等现象,造成空间天气

的剧烈变化,对人类的生产生活产生影响,严重时会引起卫星失控,破坏通讯、电网以及导航,并威胁到宇航员的生命安全.因此,对日冕的观测,不仅仅是为了获得科学价值(研究日冕物质抛射的起源、触发机制、传播和演化规律),同时还能用于监测、预警大规模太阳活动造成的空间天气变化.

法国科学家李奥(Bernard Lyot)于1930年成功地发明日冕仪,结束了长期以来人类仅能在日全食

2024-04-07收到原稿, 2024-07-22收到修改稿

*国家自然科学基金项目(12373063、11533009)资助

†lyu@swjtu.edu.cn

期间观测日冕的现状^[2]. 通常情况下, 日心强度与相邻的天空背景强度的比值为 10^4 – 10^6 之间, 导致在非日全食期间难以观测日冕, 仅能依靠特殊仪器(日冕仪)进行观测. 在野外选址的工作中, 日冕仪可以用于测量天光背景, 但李奥日冕仪的制造昂贵, 且需要其他的支持设备, 这不利于野外科考工作的进行. 1948年, Evans制造了一个小型的天空背景光度计(The Evans Sky Photometer, ESP)测量天空背景, 其问题在于太阳圆面由另一个小望远镜通过减光形成^[3–4]. 在使用时, 操作复杂、不易携带、单波段测量且需手动操控. 2004年, Lin等^[5]针对ATST (The Advanced Technology Solar Telescope)项目发明了日晕光度计(Sky Brightness Monitor, SBM). 该仪器有诸多优点, 如方便携带、4个波段同时测量、太阳圆面与天空区域同时在终端电荷耦合器件(Charge coupled device, CCD)上成像且造价便宜. 同年, Penn等^[6]测量米斯太阳天文台(Mees Solar Observatory, Haleakala)和美国萨克峰国立太阳天文台(National Solar Observatory at Sacramento Peak, New Mexico)的天光背景, 两地的(绿线, 530 nm)天光背景最低能达到 $5 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ (I_{sun} 为太阳日心强度). 黑子太阳天文台的天光背景低于 $10 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 的时间为5 h左右, 米斯太阳天文台的天光背景低于 $10 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 的时间为6 h左右.

2011年, 国内太阳物理界达成一致意向, 为下一代巨型太阳望远镜开展选址工作^[7–8]. 2012年, Liu等^[9]根据ATST项目的经验, 制造出第1台国产SBM, 其仪器杂散光系数优于国际同类设备. 从那时起, 国产SBM开始用于西部各个站点的摸底工作. 多地的样本测量结果也曾陆续发表: 昭通大山包蓝波段定标后的最小值为 $15 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ ^[10]; 昆明凤凰山蓝波段定标后的最小值为 $50 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ ^[10]; 宁夏石嘴山蓝波段定标后的最小值为 $117 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ ^[11]; 新疆奇台蓝波段定标后的最小值为 $68 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ ^[11]; 云南大理绿波段的整体天光背景水平为 $30 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 左右^[9]. 经过多年的实地测量、数据积累、耐心处理, 仍然有大量的数据没有得到及时处理. 在深入研究时, 得益于丽江观测站的优良数据(团组人员实测), Zhao等^[12]编写的自

动化处理SBM数据程序为批量处理节约大量时间, Zhao等^[13]已于2017年发表丽江站年统计数据. 本文在处理丽江站和纳木错观测点数据时也借鉴了该程序. 丽江观测站和纳木错观测点是第1轮西部计划的选址点, 其天光背景因地势各有特点. 本文第2部分介绍仪器设备和数据处理方法. 第3部分对纳木错和丽江的典型数据进行深入分析. 第4部分给出了总结—丽江站与纳木错观测点天光背景均较好, 均能达到 $10 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 量级, 可以保障日冕常规观测.

本文旨在深入分析, 丰富关于天光背景散射水平的资料, 解析不同站点的重要典范数据, 为进一步全面研究国内知名高海拔选址点, 如冷湖、稻城和慕士塔格的白日天光背景.

2 仪器设备与数据处理

2.1 仪器介绍

SBM的结构如图1所示. SBM拥有多波段测光系统, 采用蓝(450 nm)、绿(530 nm)、红(890 nm)、水汽(940 nm) 4个通道, 带宽均为10 nm, 可同时监控天光散射背景、水蒸气含量、大气消光、气溶胶含量等大气参数^[10, 14]. 在可见光波段, 绿线波段(530 nm)是日冕光谱中最强的一条谱线, 下文数据分析也以绿线为主. SBM主要包括镜筒、CCD、ND4减光片(ND, 全称neutral density)、赤道仪等. ND4减光片是由2块光学密度为2的中性减光片组成, 中性减光片在可见光波段和部分近红外波段范围内的减光能力近似相同. ND4减光片通过3根间距为 120° 的支架固定在物镜端, 在SBM中起消减太阳辐射强度的作用, 可以使日面与邻近天空在CCD上同时成像. 镜筒内边缘有3个不同大小的挡板环, 限制仪器光束和成像范围. 挡板环和ND4减光片组件上的外遮掩器作用相同, 用于对镜筒边缘衍射产生的衍射光和内部尘埃产生的散射光进行抑制.

日晕即太阳周围的大面积天空背景亮度, 其数值通常归一化到日面中心亮度的百万分之一. 太阳直射仪器造成的衍射光的量级远远超过日晕, 因此对SBM的衍射光抑制极其重要^[15]. CCD位于仪

器的焦平面位置, 在CCD读数不饱和的情况下, 可同时对日面和日晕进行数据采集, 并对其辐射强度进行对比. SBM采用自动跟踪系统, 并使用多波段CCD采集器和MaxIm DL 5软件, 相同时间采集更多的样本, 且不依赖观测助手的目测效果, 这就意味着数据的准确性大大提高. SBM的通光直径为5 mm、焦距为100 mm、焦比为20、视场大小为2.8–7.8倍太阳半径, 但通常由于衍射光的影响, 其有效视场有所减小^[14].

SBM是当前国际日冕仪选址的通用设备. Lin

等^[5]曾使用ESP仪器和SBM仪器开展交叉定标工作, 测量这两套设备之间的系统误差, 发现误差仅为 2×10^{-6} – $3 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$. Liu等^[9]曾使用国产SBM与国际SBM进行定标测试, 在平均天空背景亮度值 $15 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 以内时, 中美SBM的4个波段平均定标结果的绝对差异为 $0.9 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$, 相对差异为16.6%, 其差异也在设备的系统误差范围内. 另一方面, 我们研制的同批次SBM设备之间的测量误差也很小, 仅为 1×10^{-6} – $2 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$. 这意味着我们自主研发的SBM可以定量评价台址参数.

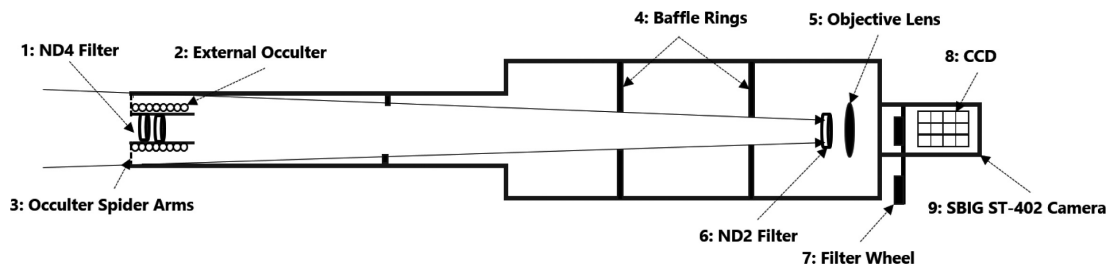


图1 SBM结构图. 1: ND4减光片; 2: 外遮掩器; 3: 遮掩器支撑臂; 4: 挡板环; 5: 物镜; 6: ND2减光片; 7: 减光片转换器; 8: CCD; 9: SBIG ST-402相机.

Fig. 1 Sketch of SBM frontier. 1: ND4 Filter; 2: External Occulter; 3: Occulter Spider Arms; 4: Baffle Rings; 5: Objective Lens; 6: ND2 Filter; 7: Filter Wheel; 8: CCD; 9: SBIG ST-402 Camera.

2.2 数据介绍

SBM的数据如图2所示, 图像大小为765像素 \times 510像素. 从里到外依次是太阳日面、ND4减光片、衍射环、天空区域、ND4支架投影. 天空区域和日晕区域均指同一片区域, 其辐射强度统称为日晕强度. 通常情况下, 日面区域的像素值在3万左右, 很大程度依赖于观测助手的曝光时间设定, 但通常不会高于6万(CCD饱和值为6.3万). 对于ND4减光片, 目的是把太阳日面的辐射强度减弱4个量级, 即希望ND4减光片在4个波段的透过率为 1×10^{-4} . 其编号和透射系数如表1所示, 丽江观测站和纳木错观测点均使用编号为8和9的ND2减光片.

衍射环的像素值通常低于太阳日面的像素值, 高于ND4减光片和相邻的天空区域. 应该注意的是: 假如日面靠近ND4减光片边缘, 衍射环通常会出现过曝、饱和现象. 衍射环大面积饱和应舍弃, 不宜使用. 对于小面积饱和, 日晕强度和日心强度均小于真实值, 意味着该方向的日晕强度不能用于

计算. 相反, 在偏差不大的情况下, 相反方向的日晕区域可用作计算. 最后是支架投影和天空区域, 在计算过程中, 支架投影区域应该被扣除. 同理, 天空区域有树或电线杆遮挡时, 该区域也应扣除, 不用做计算(图2右图矩形区域).

表1 ND2减光片透过率的定标数据
Table 1 Calibrated transmission coefficients of ND2 filter samples

Number	450 nm	530 nm	890 nm	940 nm
8	0.0109	0.0147	0.0330	0.0346
9	0.0106	0.0141	0.0326	0.0344

本文使用的数据分别采自云南丽江观测站(日期编号: 20110225)和西藏纳木错观测点(日期编号: 20131023). 丽江观测站数据共1792个数据文件, 约1.3 GB, 每个数据文件之间间隔约为1 min, 持续约8.5 h(北京时间8:28:53–16:51:18). 纳木错观

测点数据共10425个数据文件,约7.6 GB,每个数据文件之间间隔约为10 s,持续约7 h(北京时间

为9:37:45至16:27:28).数据均使用同一架SBM采集,整体质量非常好,无饱和现象.

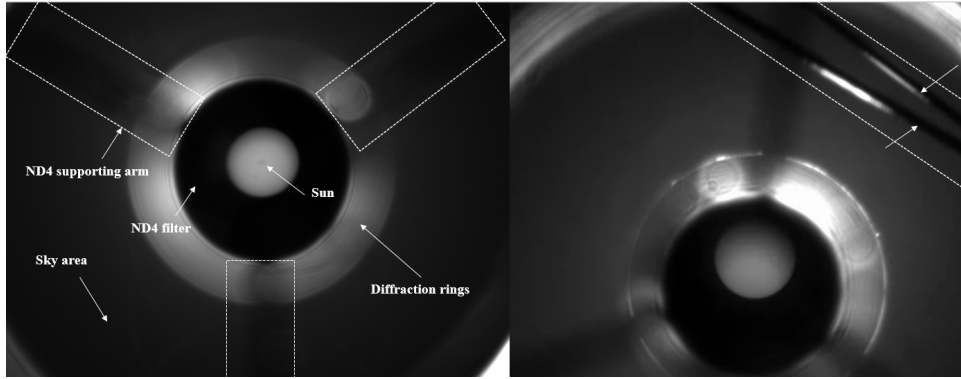


图2 左图: SBM样本从里到外依次为太阳盘面、ND4减光片、衍射环、ND4支架、天空区域(箭头指向). 右图: 箭头指向为两根电线, 该区域不能用于计算天光背景.

Fig.2 Left: SBM sample from inside to outside is solar disk, ND4 filter, diffraction rings, the ND4 supporting arms, sky area (arrow point). Right: arrow pointing is two wires, and this area cannot be used to calculate the sky brightness.

2.3 计算方法

天光背景散射水平(简称天光背景),是日晕强度与日心强度的比值,其物理意义为大气层对太阳辐射的散射能力.计算方式为^[16]:

$$S = \frac{I_{\text{sky}}}{I_{\text{sun}}}, \quad (1)$$

记 S 为天光背景. I_{sun} 取太阳质心的像素值(日心算法可参考文献[10, 17]). I_{sky} 为天空区域强度, I_{sky} 的范围为5.0–6.5倍太阳半径的弧形区域.取值范围应避免支架、衍射环,以免造成更大误差.图3是单个SBM数据文件的成像图.图3中央是通过图像分离方法获得的两个圆,小圆内部黑点为太阳质心,左右两边是距离太阳圆心5.0–6.5倍太阳半径的弧形区域.两个圆可分别用于确定ND4减光片和太阳的圆心和半径,从而计算太阳强度 I_{sun} ,两个弧形区域的平均值为 I_{sky} .具体分离方法可参考文献[10].

2.3.1 仪器散射光扣除方式

Pillet等^[16]认为测量得到的天光背景包含固有的仪器散射光,表示为

$$S_{\lambda}(\hat{n}) = \frac{I_{\text{sky}}(\hat{n}, \lambda)}{I_{\text{sun}}(\hat{n}_0, \lambda)} = \phi_{\lambda}(\hat{n}, \hat{n}_0) \kappa_{\lambda} M(\hat{n}) + B_{\lambda}. \quad (2)$$

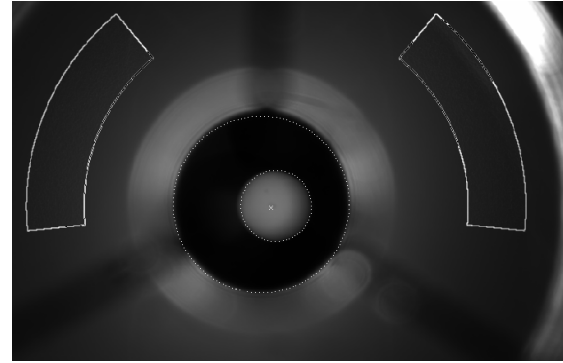


图3 SBM样本平面: 内圆、外圆分别是太阳、ND4减光片的边缘. 两个弧形表示天空区域的计算区域.

Fig.3 SBM sample plane: the inner and outer circles are the edges of the sun and ND4 filter respectively. The two arcs represent the calculated area of the sky region.

Lin等^[5]使用均匀的球面大气模型(Uniform curved atmospheric model^[5]),认为大气质量是天顶距和大气厚度的函数,进一步将(2)式简化为

$$S(Z) = B_{\lambda} + \alpha M(Z, t), \quad (3)$$

其中 $S_{\lambda}(\hat{n})$ 代表观测者视线方向某波段的天光背景,是归算太阳质心强度后的日晕值, λ 是波长, \hat{n} 和 \hat{n}_0 是观测者分别指向天空区域和太阳的方向向量, ϕ_{λ} 是该波长 λ 的大气相位函数,代表着大气层对太阳

辐射散射情况的角分布, κ_λ 是大气吸收系数, B_λ 是仪器散射光, 由波长决定, Z 是天顶距, t 是大气厚度, α 是 $\phi_\lambda \kappa_\lambda$, M 是太阳与观测点之间的大气质量, 表达式如下:

$$M(Z, t) = -R \cos Z + \sqrt{R^2 \cos^2 Z + 2Rt + t^2}, \quad (4)$$

式中 R 是地球半径与海拔之和, 通常直接使用地球半径计算. 把(4)式代入(3)式得:

$$S(Z) = B_\lambda + \alpha(-R \cos^2 Z + \sqrt{R^2 \cos^2 Z + 2Rt + t^2}). \quad (5)$$

由于(5)式有3个未知量 α 、 B_λ 、 t , 拟合难度大, 拟合过程易失败. 因此并不是每一天的数据都能通过拟合的方式扣除散射光. B_λ 是仪器固有的散射光. 在天气晴朗、大气稳定情况下, 通过(5)式拟合得到 B_λ 相对稳定, 可代表仪器固有的散射光. 目前, SBM 的 B_λ 已通过拟合得出并发表^[9]: 蓝波段: $0.77 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 、绿波段: $0.81 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 、红波段: $2.12 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 、水汽波段: $3.26 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$. 该仪器经过多年的使用, B_λ 难免有所增加, 因此团队每年对 SBM 做了镜筒内部黑色镀层工艺, 以保障仪器内部散射光水平没有明显增大.

2.3.2 本文计算方式

本文首先利用(1)式计算天光背景, 其次扣除 Liu 等^[9]发布的 B_λ , 然后得到真实的天光背景. 为进一步研究大气特征, 最后将天光背景归算到单位大气质量¹.

天光背景是大气质量的函数, 将扣除散射光后的天光背景归算到单位大气质量, 其物理量是大气相位函数和吸收函数. 归算的物理意义在于描述观测站点上空的太阳辐射的散射和吸收过程. 大气质量(4)式的计算依赖(5)式中的拟合参数 t , 故采用 Kasten 等^[18]基于标准大气模型(ISO Standard Atmosphere)提出的经验公式.

参考 Pillet 等^[16]和 Lin 等^[5]推导(5)式的过程, 大气质量 M 的本意为相对大气质量, 故经验公式完全

适用. 该公式为^[13]:

$$M(Z) = \frac{1}{\cos Z + a \cdot (b + 90 - Z)^{-c}}, \quad (6)$$

对于均匀混合气体, $a=0.50572$ 、 $b=6.07996$ 、 $c=1.63640$ ^[18]. 对于水汽吸收线 940 nm, $a=0.0548$ 、 $b=2.6500$ 、 $c=1.4520$ ^[19]. 该公式仅适用于天顶角小于 80° 的情况, 其精度为 0.5%. 更加详细的信息可参考文献[18-19].

3 数据分析

3.1 丽江站

丽江观测站($100^\circ 1'E$, $26^\circ 42'N$)位于云南省丽江市玉龙纳西族自治县高美古村. 地处横断山脉东侧和云贵高原的交接地带, 属于高海拔地区. 丽江总降水及各季节降水量在 1951-2010 年并没有明显增加或减小的趋势^[20]. 根据马开全等^[21]的台址气象资料, 在 1995 年 7 月至 1996 年 12 月期间, 丽江观测站在 2 时、8 时、14 时、20 时的云量统计中, 14 时的云量覆盖比其他 3 个时间点更大, 其中以旱季(11 月至来年 4 月)中的 2 月最为突出. 2 月的月平均温度日较差为 11.5°C , 极大值为 17.5°C , 极小值为 3.9°C , 这表明 2 月份的丽江观测站昼夜温度差大, 白天水汽蒸发最为严重.

图 4 是丽江观测站在 2011 年 2 月 25 日的天光背景随时间的变化图. 由图可知, 天光背景整体变化趋势为先减后增. 在 8:00-10:00 之间, 天光背景骤减, 其中天光背景(530 nm)由 $20 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 降至 $7 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 左右. 这与日出后大气质量不断减少直接相关, 参考(6)式. 在晴朗的天空中, 大气散射以瑞利散射为主导, 波长越小, 散射强度越大. 在图中表现为蓝波段(450 nm, 菱形)在上, 其次是绿波段(530 nm, 三角形)、红波段(890 nm, 正方形)、水汽波段(940 nm, 星号形). 应当注意的是 9:20 和 9:40 附近, 红波段和水汽波段的的天光背景明显脱离整体趋势有所增加. 经过核对, 该部分是由鬼像造成的计算偏差. 在 10:10-10:30 之间, 有 20 min 的数据为空白, 其原因是仪器更换电源导致. 在 10:30-12:00 之间, 太阳非常靠近天顶, 其天光

¹天光背景归算后的单位通常写为 $\text{ppm} \cdot \text{airmass}^{-1}$, 1 ppm (parts per million) 等于 $1 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$.

背景也达到最小值,且持续近1个半小时,这说明丽江观测站潜在能达到最优的观测条件为 $6 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 左右.天光背景从极大值($20 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$)下降至极小值($6 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$),其下降速度相对较快.红波段和水汽波段数据的天光背景偶尔会跳跃性增大,这暗示水汽以及天空云层开始有些许变化.从12:00后,天光背景开始呈现出上升、下降、再上升的过程,其特点是各波段数据混杂在一起,总体呈上升趋势.

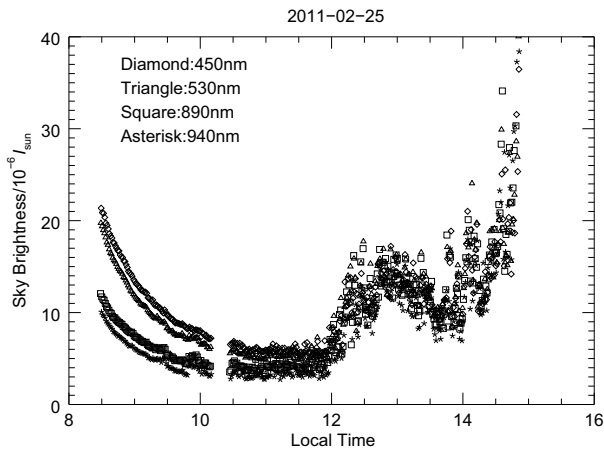


图 4 丽江站天光背景随时间变化

Fig. 4 Sky brightness variations at Lijiang station plotted against the time of the observation

图4中天光背景表现形式充分展示丽江观测站2月份的气候特点.在8:00–10:00之间,丽江观测站处于空气干燥的无云时刻,日晕值快速下降.在10:00–12:00之间,由于昼夜温差大,温度逐渐升高,地表水汽渐渐上升,水汽波段的天光背景有零散的小波动.从12:00开始,有大面积浮云飘过,各波段天光背景混乱增长.在13:00附近,浮云飘离,天光背景开始小幅度下降.在14:00时,水汽上浮形成的浓云开始大面积飘过,影响数据监测,天光背景开始飙升.从15:00开始,观测人员关闭仪器.就气象情况而言,2011年2月25日的数据最能体现丽江观测站的天光背景散射水平的大气特点,上午稳定下降适合观测,下午多云不利于观测.

图5是单位大气质量的天光背景随时间的变化,反映大气情况是否稳定.从图中可知,在8:30–

12:00之间,大气情况非常稳定,天光背景也仅有小幅度的增加,这与图4中12:00之前的数据吻合,大气散射、吸收稳定,天光背景随天顶距的减小而减小.在12:00之后,大气散射、吸收情况相对混乱,天光背景也更加复杂.总体而言,在2011年2月25日,丽江观测站上午大气稳定,天光背景在9:30后低于 $10 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$,适合日冕仪进行日冕观测.在12:00后,因浮云的影响,天光背景不利于日冕仪进行观察.这与2018年公布的丽江站数据特征吻合^[13].丽江观测站的天光背景(530 nm)最低能达到 $6 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$,低于 $10 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 的时间为3 h左右.由此得出,丽江观测站天光背景较好,可达到 $10 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 的量级,能够完成日冕仪的常规观测任务.

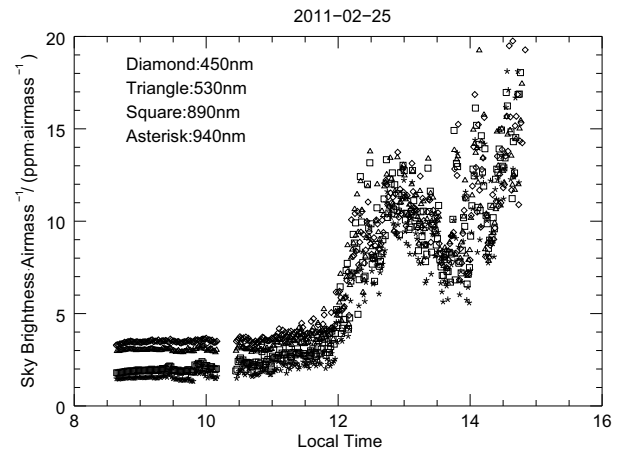


图 5 丽江站: 单位大气质量的天光背景随时间的变化

Fig. 5 Lijiang station: the change of the sky brightness per unit air mass with time

3.2 纳木错观测点

纳木错观测点($90^{\circ}53'37''\text{E}$, $30^{\circ}55'10.5''\text{N}$)位于纳木错湖的北端.纳木错湖地处青藏高原中南部,是中国国内面积排名第3的咸水湖.纳木错流域处于亚寒带季风半干旱气候区和藏北高原草原区的东南边缘地带,对区域气候变化较为敏感,流域内雨、旱季分明,6–10月是流域的季风期,受西南季风带来的印度洋暖湿气流的影响,气候温暖湿润,11月至来年5月为旱季,主要受西风环流的控制,寒冷而干燥^[22].湖泊南部为终年积雪的念青唐

古拉山, 近年来气温变暖造成冰川融化, 导致湖泊迅速扩张 79.4 km^2 , 水位上升 4.8 m ^[23]. 在10月和11月期间, 纳木错存在明显的湖泊效应降水特征, 这是因为降雨中极大降水落点与湖泊连接, 致使湖面温度低于陆地温度, 受西风的影响, 下风向(即东边靠念青唐古拉山)湖泊效应降水特征明显^[24]. 焚风是指由于空气作绝热下沉运动时, 因温度升高、湿度降低而形成的一种干热风. 纳木错湖坐落于盆地之中, 地形特点容易形成焚风. 据许洁等^[24]的统计结果表明, 10月份的纳木错累计焚风出现次数高于9月和11月. 这意味着10月份的纳木错湖常出现上午西边焚风、下午东边降雨, 以及上方大气环流

的现象. 在东边降雨之前, 大气湿度达到临界点后形成浮云, 大气环流使浮云覆盖在纳木错湖上空.

图6展示了2013年10月23日纳木错天光背景亮度随时间的变化. 左图和右图中的蓝线、绿线相同, 蓝线和绿线大部分重叠. 全天的天光背景整体趋势降低, 仅有少数时刻有云飘过. 天光背景最低发生在14:00时, 为 $8 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$. 天光背景从极大值($30.2 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$)下降至极小值($8 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$), 其下降速度缓慢. 值得注意的是红波段、水汽波段的轮廓线明显高于或重合于蓝波段和绿波段, 这是由于观测数据中存在严重鬼像, 导致长波段测量误差比短波段高10倍.

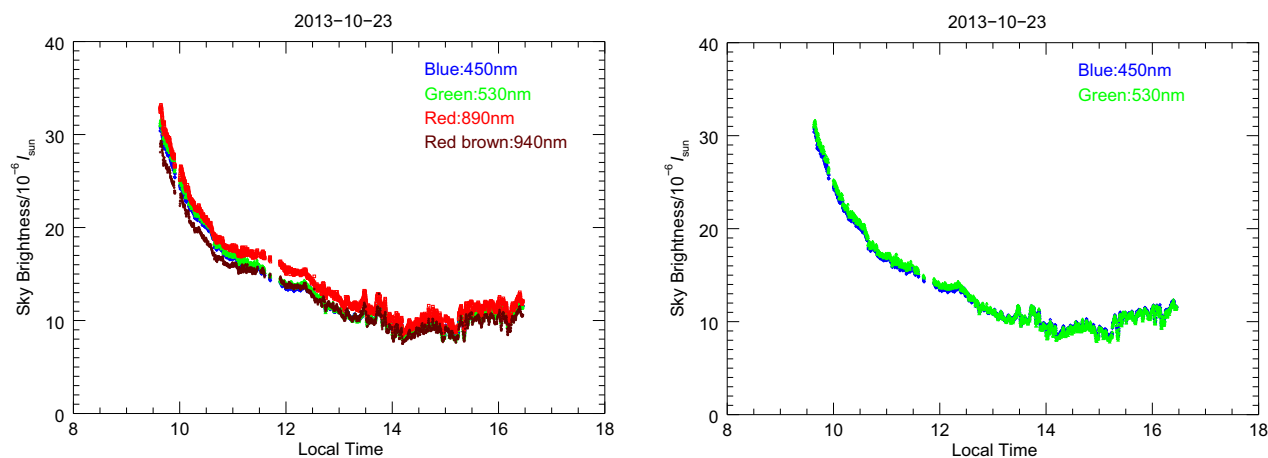


图 6 纳木错观测点天光背景随时间变化(左图: 4个波段; 右图: 两个波段)

Fig. 6 Sky brightness variations at Namco station plotted against the time of the observation (left: four bands; right: two bands)

图7左图是水汽波段ND4减光片平面的立体图像. 右图为ND4减光片内的平面图, 已去除太阳和天空区域, 箭头指向为鬼像, 内、外红线分别是太阳圆面边缘和ND4减光片边缘. 从图中的箭头处可知, 水汽波段存在严重的鬼像. 其原因为鬼像削弱日心亮度, 进一步导致水汽波段的日心强度减小. 表1中8/9号ND2减光片的水汽波段透射率分别为0.0346、0.0344. 理论上ND4减光片的作用在于使太阳辐射削弱4个量级, 而8/9号组成的ND4减光片仅消减3个量级. 综合上述原因, 红波段和水汽波段测量误差远大于蓝波段和绿波段, 对此不采用纳木错数据集的红波段(890 nm)和水汽波

段(940 nm). 丽江观测站也使用了8/9号ND2减光片, 其红波段(890 nm)和水汽波段(940 nm)表现正常, 原因在于丽江数据中长波段鬼像不严重.

回顾图6中两个短波段(绿线和蓝线)的天光背景轮廓. 当太阳到达天顶附近, 其天光背景降至最低点附近. 由于太阳的直射, 湖中水汽加快蒸发, 并在西风带来的干燥、温暖条件下上升遇冷形成云层. 这导致天光背景处于最低点的时间较短, 大约持续一个半小时. 受纳木错湖高原气候特征影响, 16点开始出现大量浮云, 不利于日冕仪进行观测. 观测助手观测到大量浮云飘过就停止设备监测. 由图8中单位大气质量的天光背景值可知, 其大气情

况相对稳定,这也暗示着纳木错观测点的天光背景已达到极限 $8 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$. 总体而言,在2013年10月23日,纳木错观测点的气候特征稳定,天光背景下降速度较为缓慢. 纳木错观测点的(绿线, 530 nm)天光背景最低能达到 $8 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$, 低于 10×10^{-6}

I_{sun} 的时间为4 h左右,单位大气质量的天光背景在云层出现前基本能够保持较低水平,长达2-3 h(如图8). 因此得出,纳木错观测点天光背景较好,能达到 $10 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 量级,同样可以完成日冕仪对日冕的常规观测任务.

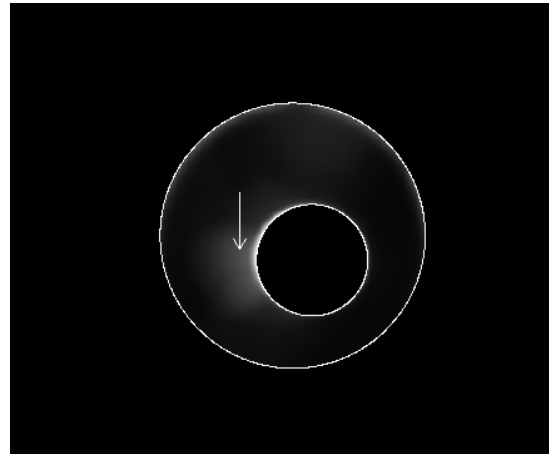
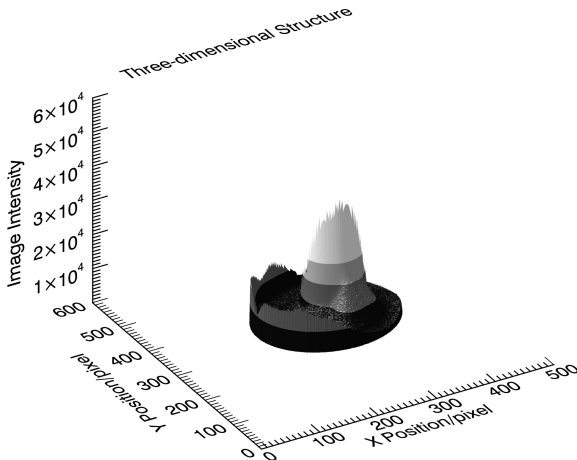


图 7 左图为水汽波段(940 nm)立体图, 去除太阳和天空区域. 右图为左图数据的平面图, 箭头指向为鬼像, 内外圈分别为太阳、ND4减光片边缘.

Fig. 7 The panel on the left is a stereogram of the water vapor band (940 nm) with the sun and sky regions removed. The panel on the right is a planar graph of the data on the left. The arrow points to the ghost image, and the inner and outer rings are the sun and the edge of the ND4 filter, respectively.

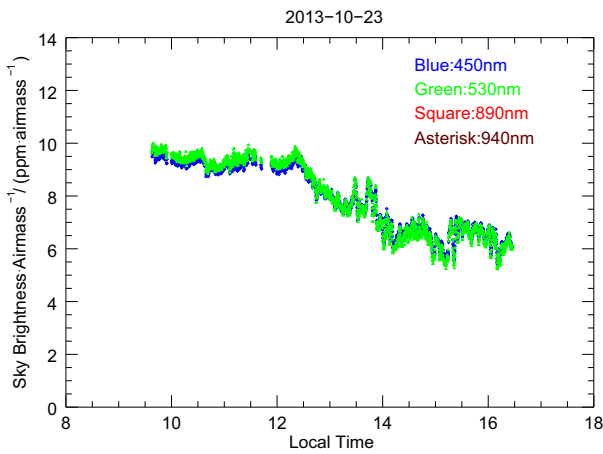


图 8 纳木错观测点: 单位大气质量的天光背景随时间的变化

Fig. 8 Namco station: the change of the sky brightness per unit air mass with time

3.3 天光背景下降速率

图9显示了丽江观测站和纳木错观测点的天光

背景随时间的变化. 天光背景在 $10 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 量级的台址可进行常规的日冕观测, 天光背景在 $10 \times 10^{-6} - 20 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 之间的台址有机会进行日冕观测. 为更准确地描述天光背景的下陷速率, 选天光背景在 $20 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 到最小值范围内的数据, 并按下式进行拟合:

$$y = A \cdot x^2 + B \cdot x + C. \quad (7)$$

拟合参数如下表2. 标准误差分别为0.75和0.67. A 代表着函数的陡峭度, A 越大, 天光背景下陷速率越快. 由表2可知, 丽江观测站的下陷速率优于纳木错观测点. 进一步求导处理得到下陷速率, 由此得到丽江观测站的下陷速率范围为 $[0, 9.16]$, 平均下陷速度为 $4.58 \text{ ppm} \cdot \text{h}^{-1}$, 纳木错观测点的下陷速率范围为 $[0, 5.09]$, 平均下陷速度为 $2.545 \text{ ppm} \cdot \text{h}^{-1}$. 在天光背景下陷阶段, 丽江观测站的平均单位大气质量的天光背景为 $3.39 \text{ ppm} \cdot \text{airmass}^{-1}$, 纳木错观测点的平均单

位大气质量的天光背景为 $7.78 \text{ ppm} \cdot \text{airmass}^{-1}$.

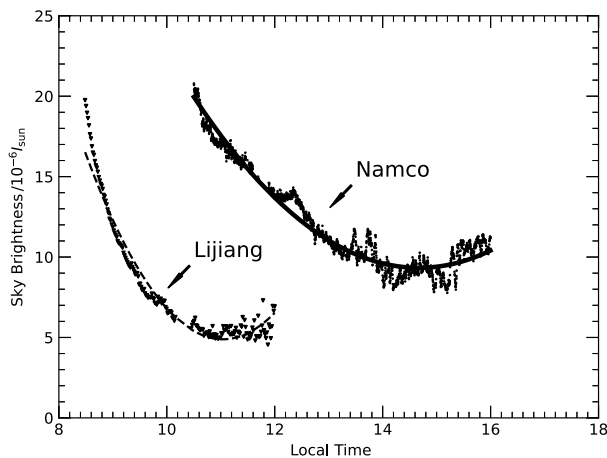


图9 天光背景随时间的变化. 箭头指向分别是丽江观测站和纳木错观测点. 实线和虚线分别为天光背景的二次方拟合.

Fig. 9 The change of sky brightness with time. The arrow points to Lijiang station and Namco site, respectively. The solid and dashed lines are quadratic fitting of the sky brightness, respectively.

表 2 天光背景下降曲线的拟合参数
Table 2 Fitting parameters of sky brightness descending curve

Site	A	B	C	Standard Error
Lijiang	1.83	-40.51	229.05	0.75
Namco	0.61	-17.92	140.82	0.67

3.4 对比讨论

通过对两组代表性数据进行处理, 我们得出以下结果: 丽江观测站的天光背景(三角形, 530 nm)最小值为 $6 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$, 持续时间为1.5 h, 天光背景小于 $20 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 的时间仅出现在上午, 持续3.5 h. 而纳木错观测点的天光背景(绿线, 530 nm)最小值为 $8 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$, 持续时间为1 h, 天光背景小于 $20 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 的时间持续5.5 h, 从10:30开始至16:00结束. 通常, 国际优秀日冕观测台址的天光背景低于 $10 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$, 天光背景在 $10 \times 10^{-6} - 20 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 之间的台址能够完成常规的日冕观测任务. 在天光背景方面, 丽江观测

站和纳木错观测点的天光背景均能达到 $10 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 的量级, 两地均具备开展日冕常规观测的条件. 应注意到, 纳木错观测点和丽江观测站相互配合、联合观测可提供长达7 h的连续可观测时间(9:00–16:00). 对太阳和行星际空间的监测以及空间天气预警等, 需要多设备、多地点联合运行. 国内外多点联合观测是未来的发展趋势. 例如, 巴西正在建设的太阳射电望远镜将与稻城圆环阵太阳射电成像望远镜联合, 可实现对太阳的昼夜连续观测^[25]. 在可见光领域, 对太阳的昼夜连续观测也需要国内多台站共同联合, 以突破东半球的观测时间限制. 纳木错观测点的天光背景条件满足建设日冕仪观测站的要求, 这使其成为一个潜在的备选地点. 当前的子午工程二期呈现出地基监测网络化、综合化的发展趋势, 而西部地区的监测台站布局较为稀疏, 这为纳木错观测点提供了一个发展契机.

最理想的天光背景时间轮廓应具有下降速度快、持续时间长的特点, 即天光背景能够在最短时间内到达最小值并长时间维持. 在天光背景下降过程中, 我们计算了天光背景从 $20 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ (20 ppm)下降至最小值的下降速率, 目的是反映天光背景的下落特性. 丽江观测站的平均下降速率为 $4.58 \text{ ppm} \cdot \text{h}^{-1}$, 平均单位大气质量的天光背景为 $3.39 \text{ ppm} \cdot \text{airmass}^{-1}$, 纳木错观测点的平均下降速率为 $2.545 \text{ ppm} \cdot \text{h}^{-1}$, 平均单位大气质量的天光背景为 $7.78 \text{ ppm} \cdot \text{airmass}^{-1}$. 显然, 丽江观测站的天光背景下降特性更符合预期. 单位大气质量的天光背景反映了大气的散射和吸收(包含气溶胶、水汽和粒子成分3方面的影响)作用. 丽江位于中国最洁净的大香格里拉地区, 大气浮尘含量较低, 而纳木错处于青藏高原干旱少雨地区, 浮尘含量相对较高. 相对而言, 丽江观测站的空气质量优于纳木错, 其单位大气质量的天光背景也低于纳木错观测点. 纳木错观测点平均单位大气质量的天光背景是丽江观测站的2.29倍, 意味着相同的太阳辐射强度, 纳木错观测点的散射辐射强度是丽江的1倍多, 因此纳木错观测点的日晕强度也显著高于丽江观测站. 就天光背景的时间轮廓而言, 纳木错观测点的天光背景下降速率更为缓慢. 此外, 丽江观测站和纳木错观测点的天光背景在下午表现出截然不同

的天光背景特性. 在实测方面, 丽江观测站是肉眼可见的云量飘过, 纳木错观测点是无云状态. 在理论层次, 参考图5和图8, 纳木错观测点单位大气质量的天光背景在14:00–16:00之间没有太大变化, 本身是大气组成成分没有大改变, 而丽江观测站是截然相反, 云的出现改变了大气组成成分(水汽的含量), 致使天光背景也大幅度改变. 总体而言, 丽江观测站上午的观测条件优于下午, 更适合日冕观测, 这一结论与丽江的统计结果一致^[13]. 尽管纳木错观测点在16:00前的天光背景比丽江观测站的天光背景更亮, 但是在16:00前仍适合进行日冕观测.

4 总结

日冕是太阳大气的重要组成部分之一, 也是太阳物理领域中的重点观测和研究对象. 目前, 国内日冕仪技术正在蓬勃发展, 而日冕仪的发展离不开台站的建设. 优秀的台址参数不仅决定了望远镜的成像质量, 也是望远镜终端仪器和台址建设的重要评判依据. 在光学波段, 天光背景是衡量日冕观测台站是否优秀的重要参数之一. 本文基于国产SBM观测记录的两组代表性数据(丽江站、纳木错观测点), 结合地理位置、气候特点, 对一天中天光背景的不同变化过程进行了逐步解析. 使用量化下降速度和归算天光背景的方式研究台址的日晕特征, 掌握并理解了丽江观测站和纳木错观测点的天光背景时间轮廓. 由此我们得出结论: 丽江观测站和纳木错观测点的天光背景(530 nm)变化规律各不相同, 但天光背景最小均能达到 $10 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$ 的量级, 表明这两个站点能够满足日冕常规观测的需求. 同时, 依据两个址点的天光背景时间轮廓特点, 丽江观测站更适合上午观测, 天光背景值低且稳定(最小值为 $6 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$, 持续1.5 h). 相比之下, 纳木错观测点适合长时间日冕观测, 低天光背景的持续时间长(从10:30到16:00的天光背景均小于 $20 \times 10^{-6} I_{\text{sun}}$). 这两个址点优缺互补, 可提供长

达7 h的连续可观测时间. 这对于地基监测空间天气的多设备、多地点的需求而言, 纳木错观测点在可见光领域、太阳与行星际空间监测方面具有重要价值. 目前, 鉴于纳木错观测点仅公布少量数据, 后续工作将围绕对纳木错天光背景的统计展开, 并与其他台站进行深入对比研究.

致谢 感谢审稿人对文章提出的宝贵建议, 使得文章的质量有了显著的提高.

参考文献

- [1] 章振大. 日冕物理. 北京: 科学出版社, 2000: 23
- [2] Lyot B. MNRAS, 1939, 99: 580
- [3] Evans J W. JOSA, 1948, 38: 1083
- [4] 刘煜, 高菁华, 裴晓星. 天文研究与技术, 2012, 9: 290
- [5] Lin H, Penn M J. PASP, 2004, 116: 652
- [6] Penn M J, Lin H, Schmidt A M, et al. SoPh, 2004, 220: 107
- [7] Fang C. RAA, 2011, 11: 12
- [8] Liu Y, Zhao L. MNRAS, 2013, 432: 1674
- [9] Liu Y, Shen Y D, Zhang X F, et al. SoPh, 2012, 279: 561
- [10] 刘顺庆, 段辑, 张雪飞, 等. 天文研究与技术, 2012, 9: 8
- [11] 刘顺庆, 刘煜, 宋腾飞, 等. 天文研究与技术, 2012, 9: 295
- [12] Zhao M Y, Liu Y, Elmhamdi A, et al. MNRAS, 2014, 443: 1955
- [13] Zhao M Y, Liu Y, Elmhamdi A, et al. SoPh, 2017, 293: 1
- [14] 宋腾飞, 刘顺庆, 张雪飞. 气象科技, 2013, 41: 46
- [15] 刘念平, 刘煜, 申远灯, 等. 天文学报, 2011, 52: 11
- [16] Pillet V M, Cobo B R, Vázquez M. SoPh, 1990, 125: 211
- [17] 温骁, 刘煜, 宋腾飞, 等. 天文研究与技术, 2012, 9: 176
- [18] Kasten F, Young A T. ApOpt, 1989, 28: 4735
- [19] Kasten F. AMGBB, 1965, 14: 206
- [20] 刘翔卿, 王雷, 刘阳, 等. 气候与环境研究, 2018, 23: 11
- [21] 马开全, 于建明, 刘子忠, 等. 天文研究与技术, 1999, 2: 67
- [22] 陈锋, 康世昌, 张拥军, 等. 山地学报, 2009, 6: 7
- [23] 杜娟, 文莉娟, 苏东生. 高原气象, 2020, 39: 14
- [24] 许洁, 马耀明, 孙方林, 等. 高原气象, 2018, 37: 1535
- [25] 王赤, 宗位国, 杜丽芳, 等. 航天器环境工程, 2021, 38: 225

The Variations in the Sky Brightness of Lijiang and Namco throughout the Day

LIU Qiang^{1,2} LIU Yu^{2,3} SONG Teng-fei³ REN An-bing¹ ZHAO Ming-yu³
ZHANG Xue-fei³ LI Xiao-bo³ ZHU Feng-rong² SHA Fei-yang^{2,3} OLOKETUYI Jacob Oladeji²
WANG Xin-jian² DUAN Xiao-mei² LUO Qi-wang²

(1 School of Physics and Astronomy, China West Normal University, Nanchong 634702)

(2 School of Physics Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756)

(3 Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650011)

ABSTRACT The sky brightness is an important parameter to evaluate the excellence of a coronal observatory, which directly determines whether the coronagraph can measure and monitor the coronal activity for a long time. The Sky Brightness Monitor (SBM) is a precision instrument for accurately measuring important atmospheric parameters such as the sky brightness, water vapor content, and atmospheric extinction. It is also an universal instrument for coronagraph site selection and an important equipment for solar site selection in western China. Before conducting statistical analysis on the accumulated data from Namco and Lijiang, this paper first performs an in-depth analysis using representative data from Namco and Lijiang. The aim is to preliminarily study and understand the characteristics of the sky brightness at the site based on the profiles of the representative data. Firstly, by considering the actual climatic characteristics and the normalized sky brightness, the paper gradually explains the different variations of the sky brightness throughout the day. Secondly, we establish an effective calculation method to measure and reveal the evolution characteristics of the sky brightness. The results show: (1) the sky brightness (green line, 530 nm) at the Lijiang station with an altitude of 3200 meters and the Namco site with an altitude of 4700 meters are both relatively good. The minimum values can reach the order of 10×10^{-6} , ensuring the feasibility of regular corona observations; (2) the sky brightness at the Namco site and the Lijiang station evolves differently over time. The Lijiang station is not suitable for all-day observations, with morning conditions being far superior to those in the afternoon. In contrast, the Namco site has a longer observation time (from 9:00 AM to 4:00 PM), and its cooperation with the observation equipment of other stations can significantly improve the efficiency of space weather ground monitoring. The analysis results not only provides a sample analysis for subsequent statistics on the sky brightness at Namco but also demonstrates the expected characteristics of the sky brightness at Namco.

Key words telescopes: site testing, astronomical instrumentation, methods: data analysis, techniques: image processing