

西藏地面太阳总辐射与紫外线的观测

诺桑, 晋亚铭*, 措加旺姆, 周毅, 索朗白姆, 拉瓜登顿

西藏大学太阳紫外线实验室, 西藏拉萨 850000

摘要 地面太阳光谱记录了太阳光经历大气层的烙印与信息, 为大气环境、生态保护等研究提供实地依据。西藏高原空气稀薄, 地面太阳辐射超强, 观测西藏地面太阳光谱为太阳能利用提供实地数据。文章较系统地报道了西藏地面太阳光谱的实地观测结果, 为相关高原科学研究提供高精度数据。利用 RAMSES 光谱仪、CMP6 太阳总辐射仪和 NILU-UV 太阳紫外辐射仪对西藏不同地区、不同季节太阳光谱、太阳总辐射和太阳紫外线进行了全方位的实地观测研究。观测研究了高海拔的西藏拉萨和那曲以及低海拔的北京和成都的光谱特征; 研究了拉萨二分二至当地正午(北京时间 13:55 时)太阳光谱观测结果; 对西藏地面光谱与 AM1.5 和 AM0 标准光谱进行了对比研究。观测研究了西藏拉萨和那曲太阳总辐射、太阳紫外线强度特征。研究发现拉萨夏季可见和红外区光谱光强度甚至超过 AM0 光谱相应波长的强度, 即: 拉萨地面可见光和红外光强度偶尔超过大气层顶部的相应波长光强, 是由部分云的反射增量所致; 拉萨光谱谱峰出现在波长 476.6 nm 左右, 在 2017 年的夏至观测到的最大值为 $2.331 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ 。然而, 对太阳紫外线(280~400 nm)光谱的观测发现地面太阳紫外区的光谱强度总是明显低于 AM0 光谱相应区光强, 表明短波的紫外光被大气臭氧有效吸收。虽然拉萨海拔 3 680 m, 但通过对拉萨当地正午太阳紫外光谱分析发现拉萨地面波长小于 300 nm 的太阳紫外光谱强度几乎为零, 表明波长小于 300 nm 的太阳紫外线被大气层吸收, 没有到达地面。同时, 研究了西藏高海拔太阳光谱与北京、成都低海拔太阳光谱特征, 揭示了各地大气成分、含量等诸多信息。报道了 2010 年 7 月—2013 年 12 月期间西藏太阳总辐射的观测结果; 结果显示拉萨当日太阳总辐射最大值中约 18% 超过了太阳常数($1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)。观测发现拉萨太阳总辐射瞬时最大值达到了 $1756.09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (2011 年 6 月 24 日)。报道了 2008 年 7 月—2013 年 12 月期间西藏太阳紫外线的观测结果; 结果显示拉萨和那曲 UVA 日最大值平均值约为 $67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, UVB 日最大值平均值约为 $5.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; 拉萨和那曲当日太阳紫外线 A 和紫外线 B 最大值变化趋势保持了很好的一致性, 在 5 年多的观测期间紫外线强度没有出现明显的增强或减弱趋势。

关键词 西藏; 太阳光谱; 太阳总辐射; 太阳紫外辐射

中图分类号: P182.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)06-1683-06

引言

西藏高原作为全球太阳辐射高值区^[1], 近年来对其太阳能利用和大气环境的研究倍受国内外的关注。西藏高原地面太阳辐射的观测研究对其太阳能的利用、大气环境、植被^[2]、湖水^[3]等的研究提供重要依据。目前, 国内对青藏高原太阳辐射的实地观测研究较少, 主要基于辐射传输模拟理论和遥感卫星观测^[4]。理论模拟和遥感观测研究有其一定优

点和应用参考价值, 但是与实地观测研究相比获得的结论精确度和实际参考价值是无法比拟的。实地观测研究能提供一天 24 小时的实时精确的地面数据, 而理论模拟和卫星观测无法提供实时精确数据。在西藏高原设立了不少地面太阳辐射观测站, 包括气象站、部分太阳能电站和西藏大学太阳辐射观测站, 其中与挪威合作研究的西藏高原太阳辐射观测结果发表了多篇论文^[5-7], 包括对西藏海拔 3 000~5 000 m 太阳紫外辐射、总辐射等的观测研究结果。西藏地面太阳辐射的观测研究主要集中在太阳紫外线和总辐射的观测研究方

收稿日期: 2018-05-07, 修订日期: 2018-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41475139), 西藏大学珠峰学者培养计划基金项目, 中央财政支持地方高校发展专项资金项目(西藏太阳能资源与开发利用)项目资助

作者简介: 诺桑, 1962 年生, 西藏大学太阳紫外线实验室教授 e-mail: 2218473811@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: 1725364450@qq.com

面,对西藏太阳光谱的观测研究目前几乎处于空白和起步阶段,除了西藏大学首次对拉萨地面太阳光谱进行了短期的观测发表了一篇初步观测结果的论文^[8],国内外未见相关研究报道。太阳光谱的观测在大气污染物反演、大气成分的测量和太阳能电池效率的研究等领域都提供关键的数据依据。因此,本文报道了西藏地面光谱更多、更系统的观测结果。

1 西藏地面太阳辐射观测

1.1 观测站

西藏大学在西藏六个地区(拉萨、日喀则、珠峰、阿里、那曲和林芝)建有太阳辐射观测站,本次利用了拉萨和那曲两个站点的太阳辐射观测数据。拉萨站点位于西藏拉萨市西藏大学新校区内四层楼楼顶(91.18°E, 29.65°N, 海拔 3 683 m, 当地正午为北京时间 13:55 时)。西藏大学新校区位于拉萨市东郊,地理位置平坦、周边建筑高度满足观测要求,具体周边地貌情况如图 1(a)所示。西藏那曲观测站位于那曲地区色尼区东北侧一层楼房顶上(92.06°E, 31.47°N, 海拔 4 510 m, 当地正午为北京时间 13:52 时),该站点地理位置也平坦、周边小山丘、具体地貌情况如图 1(b)所示。

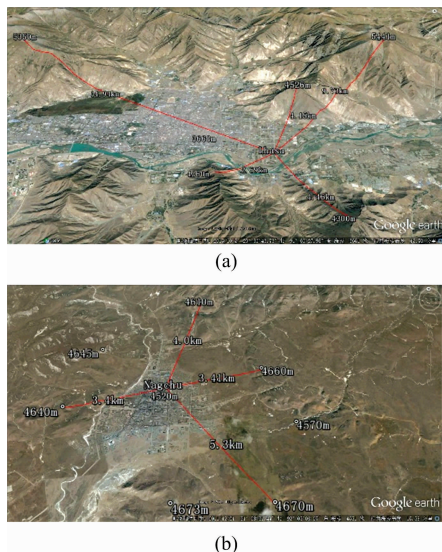


图 1 (a) 西藏拉萨太阳辐射观测站;
(b) 西藏那曲太阳辐射观测站

Fig. 1 (a) Solar radiation observation site in Lhasa, Tibet;
(b) Solar radiation observation site in Nagchu, Tibet

2.2 观测仪器

西藏太阳光谱观测使用德国 TriOS 公司生产的 RAMSES 系列两套光谱仪。利用 RAMSES-ACC-UV 紫外光谱仪观测太阳紫外光谱(280~500 nm, 波长精度为 0.2 nm);利用 RAMSES-ACC-VIS 紫外-可见光谱仪观测太阳紫外-可见光谱(320~950 nm, 波长精度为 0.3 nm), 两套光谱仪如图 2(a)所示。两套光谱仪均在 2016 年新购置, 购置前做好了绝对校准, 在观测期间自己定期做了相对校准。观测时间间隔定为 1 min, 即:每分钟记录一次数据。

西藏太阳总辐射观测采用了由荷兰 Kipp&Zonen 公司生产的国际通用 CMP6 型太阳总辐射观测仪。观测前在北京中国气象局做了绝对校准。观测波长范围 310~2 800 nm, 最大可测辐射强度 $2\ 000\ \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 仪器如图 2(b)所示。

西藏太阳紫外线观测利用了由挪威 NILU AS 公司生产的多频道紫外辐射仪 NILU-UV 探测仪, 如图 2(c)所示。该探测仪设有六个频道, 其中紫外线区有五个频道, 中心波长分别为 305, 312, 320, 340 和 380 nm, 各频道带宽约为 10 nm, 第六个频道位于可见光区。绝对校准由厂家提供, 在观测期间每十天定期进行相对校准工作。

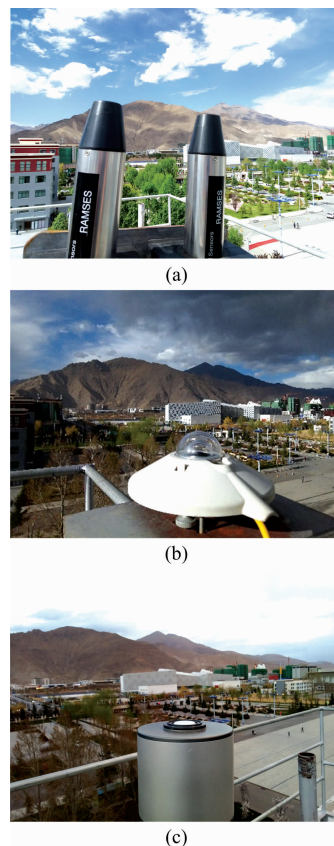


图 2 (a) RAMSES 光谱仪; (b) CMP6 总辐射仪;
(c) NILU-UV 紫外线探测仪

Fig. 2 (a) RAMSES hyperspectral irradiance sensors; (b) CMP6 pyranometer; (c) NILU-UV irradiance meter

2 观测结果

2.1 太阳光谱观测结果

拉萨晴天当地正午(北京时间 13:55)光谱变化特征。利用 RAMSE-ACC-VIS 光谱仪在 2017 年 1 月至 12 月对拉萨晴天条件下当地正午太阳光谱进行了定期的观测研究。研究了拉萨每月晴天当地正午光谱变化特征。图 3(a)显示了拉萨 2017 年 1 月—7 月期间(2 月和 4 月无数据)每月晴天当地正午光谱观测结果。可以看出拉萨 1 月至 7 月太阳光谱曲线逐渐变强的特征, 除了 1 月外, 其余月份的晴天当地正午光谱强度都超出了 AM1.5 标准光谱强度; 7 月 21 日拉萨当地正

午的光谱强度出现极强特征,在波长 500 nm 以上的光强接近或甚至超过了 AM0(大气层外)光谱强度。图 3(b)显示了拉萨 2017 年 8 月—12 月期间每月晴天当地正午光谱观测结果。拉萨 8 月至 12 月光谱强度呈现逐渐减弱现象,而且月光谱均在 AM0 光谱之下。8 月和 9 月晴天当地正午光谱强度接近或略超出了 AM1.5 标准光谱强度,10 月,11 月和 12 月光谱强度均在 AM1.5 标准光谱之下。

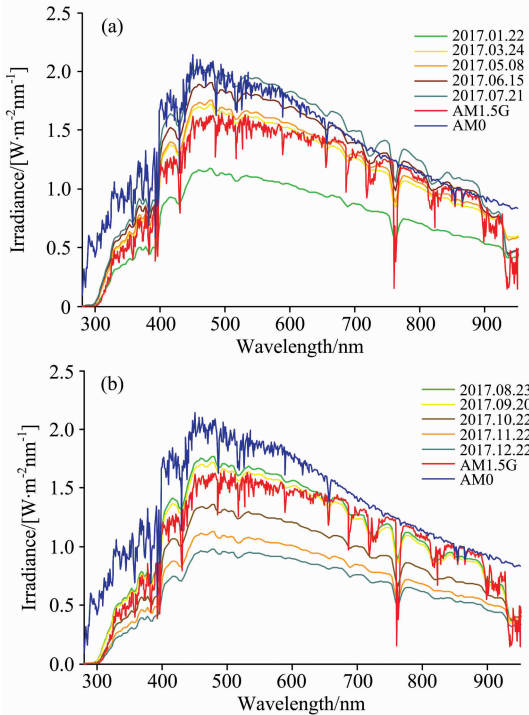


图 3 (a), (b) 拉萨 2017 年晴天当地正午光谱
Fig. 3 (a), (b) Local noon spectra for clear days in 2017 in Lhasa

拉萨夏至太阳光谱特征分析。拉萨夏至 2017 年 6 月 21 日天气情况为离散云状态,地面太阳总辐射强度波动较大,图 4 中太阳总辐射强度曲线出现大幅波动现象,反应了当天的离散云天气情况。根据图 4 中总辐射变化情况,选择了当天总辐射最强(1 517.9 W · m⁻²)时刻(13:29 时)的太阳光谱特征,图 5 中光谱为拉萨夏至当天最强光谱。波长 400 nm 以上拉萨夏至观测光谱强度接近或超过了 AM0 光谱(大气层外面的光谱)强度,最大光谱强度(2.33 W · m⁻² · nm⁻¹)出现在波长 476.6 nm 左右,属于青光区。太阳光中波长较长的光基本不被大气层吸收,西藏空气气溶胶相对少,散射影响也相对小,因而大部分长波太阳光穿透大气层到达地面。加上特定条件下离散云对地面太阳光的增强效应,偶尔造成地面光谱强度超过 AM0 光谱的现象。

太阳光中波长越短被大气吸收越强,因此紫外线部分被大气吸收明显。可见光和红外光吸收弱。加上云的反射增加效应,出现了图所示的现象。拉萨冬至 12 月 22 日太阳光谱强度最低,如图 3(b)所示,当天光谱最强值也仅达到了 0.98 W · m⁻² · nm⁻¹,几乎是 AM0 光谱强度的一半。

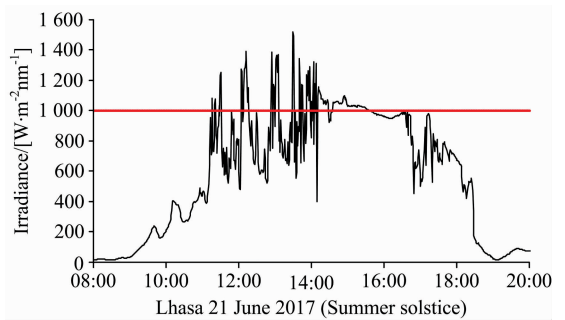


图 4 拉萨夏至(2017 年 6 月 21 日)多云天气太阳总辐射
Fig. 4 Global irradiance for the cloudy summer solstice (Jun. 21, 2017) in Lhasa

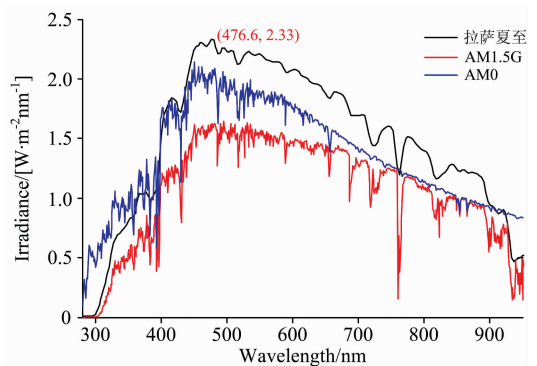


图 5 拉萨夏至 2017 年 6 月 21 日太阳光谱
Fig. 5 Solar spectra for the summer solstice (Jun. 21, 2017) in Lhasa

拉萨太阳紫外光谱特征。利用 RAMSE-ACC-UV 光谱仪在 2017 年对拉萨太阳紫外光谱进行了观测研究。通过对拉萨二分二至当地正午太阳紫外光谱分析,发现虽然拉萨海拔 3 680 m,但是四季实地观测表明拉萨地面波长小于 300 nm 的太阳紫外光谱强度几乎为零,表明波长小于 300 nm 的太阳紫外线被大气层吸收,没有到达地面,如图 6 所示。图 6 表明地面四季紫外(280~400 nm)光谱强度均远远低于 AM0 光谱,这是由于短波太阳紫外线高效地被大气臭氧等吸收以及短波瑞利散射(Rayleigh scattering)所致,波长越短瑞利散射越明显。拉萨紫外光谱强度呈现冬至最低,夏至最高的现象。

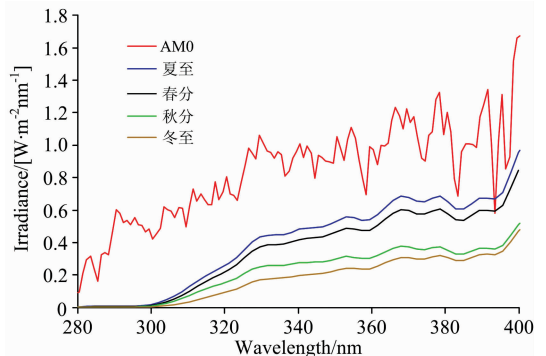


图 6 拉萨 2017 年二分二至太阳紫外光谱特征
Fig. 6 Solar UV spectra for the two equinoxes and solstices in 2017 in Lhasa

西藏高海拔与内地低海拔太阳光谱特征对比。利用同一台 RAMSE-ACC-VIS 光谱仪(观测波长范围: 320~950 nm)在 2015 年 7 月 4 日, 6 日和 8 日分别对拉萨, 成都和北京进行了太阳光谱观测。如图 7 给出了各地当地正午附近光谱特征比较。发现拉萨(多云)光谱强度比北京(雾霾)和成都(多云)高出一倍以上。拉萨光谱与 AM0(大气层外光谱)光谱差不多, 说明高原大气很薄, 吸收和散射的物质很少; 北京和成都光谱比 AM0 光谱低一半左右。说明低海拔大气厚, 吸收和散射造成的消光效应高。低海拔地区大气中吸收光谱的分子多, 主要有水汽(H₂O)、臭氧(O₃)、氧气(O₂), 以及气溶胶等, 如图 7 所示, 大气散射现象也是消光的重要原因, 波长短的紫外光主要是臭氧(O₃)和瑞利散射消光, 长波主要有水汽(H₂O)、氧气(O₂)和米氏散射(Mie scattering)消光。数据分析还发现拉萨太阳光谱波峰出现在波长 476.6 nm 处, 北京在 480.4 nm, 而成都波峰在 480.1 nm 处, 各地光谱波峰出现的位置有所不同。

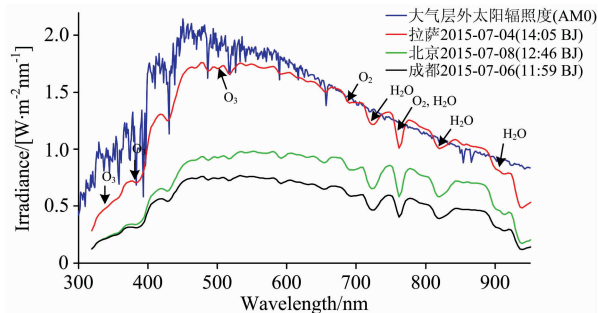


图 7 拉萨、北京和成都太阳光谱特征对比
Fig. 7 Comparison of solar spectra among Lhasa, Beijing and Chengdu

太阳光谱记录了光强随波长的分布规律, 光谱对波长的积分给出此刻太阳总辐射强度。采用了 CMP6 型太阳总辐射观测仪(测波长范围 310~2 800 nm), 在 2010 年 7 月至 2013 年 12 月期间观测了拉萨和那曲地区的太阳总辐射强度变化情况, 图 8 显示了观测期间每日最大总辐射瞬时值。发现西藏太阳总辐射强度非常高, 一年中那曲 23.6%, 拉萨 18.6% 最大值超过了太阳常数(1 367 W·m⁻²)。太阳常数(solar constant)是指垂直照射在日地平均距离处(大气层之外)的太阳总辐射量。这些超强辐射很多都是在有部分云或离散云的情况下出现的。西藏的太阳辐射本身很强, 加上在有部分云或离散云的天气情况下, 或当太阳没有被云层遮蔽, 但是太阳周边存在部分云时, 由于太阳周边云的额外反射使地面太阳辐射强度增强。在四年多的观测期间, 约那曲 70%, 拉萨 62.5% 的每日最大总辐射值超过了 AM1.5 标准总辐射强度值 1 000 W·m⁻²; 发现拉萨太阳总辐射瞬时最大值达到了 1 756.09 W·m⁻² 的超强值(2011 年 6 月 24 日), 如图 8 所示。

太阳紫外线对地面生态、动植物、人类健康以及材料老化等起到各种影响。根据太阳紫外光谱观测表明地面太阳紫外线只有紫外线 A(315~400 nm)和少量的紫外线 B(280~315 nm)。紫外线 C(100~280 nm)几乎全部被高空大气臭氧

等吸收。利用 NILU-UV 太阳紫外线探测仪, 在 2008 年 06 月至 2013 年 12 月期间观测了西藏拉萨和那曲太阳紫外线 A 和紫外线 B。图 9 和图 10 显示了西藏两地太阳紫外线 A 和紫外线 B 剂量率日最大值及其年变化观测结果。五年半的观测期间紫外线 A 和紫外线 B 强度日最大值平均分别约为 67 和 5.1 W·m⁻²; 紫外线 B 平均值只占紫外线 A 平均值的 7% 左右。所以地面太阳紫外线 B 很少, 但是其生物效应非常显著, 该内容超出本文的范围, 在此不予进一步讨论。图 9 和图 10 显示拉萨和那曲当日太阳紫外线 A 和紫外线 B 最大值变化趋势保持了很好的一致性, 在观测期间西藏两地太阳紫外线强度没有出现明显的增强或减弱趋势, 除了最后一年的突然增强现象。

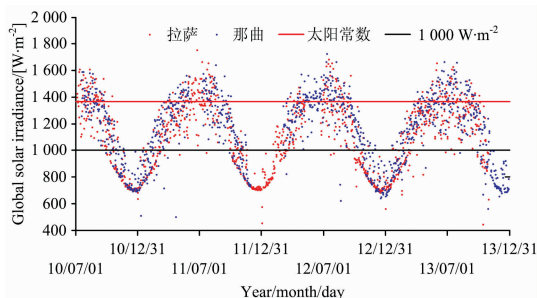


图 8 西藏太阳总辐射日最大值及其年变化
Fig. 8 Daily maximum and annual variation of global solar irradiance in Tibet

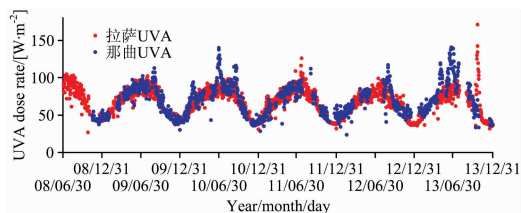


图 9 西藏太阳紫外线 A 日最大值及其年变化情况
Fig. 9 Daily maximum and annual variation of solar UVA irradiance in Tibet

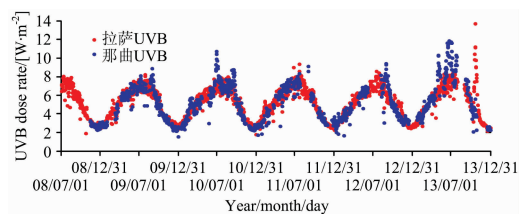


图 10 西藏太阳紫外线 B 日最大值及其年变化
Fig. 10 Daily maximum and annual variation of solar UVB irradiance in Tibet

在 2008 年—2013 年观测期间, 太阳紫外线在夏季偶尔发生了突然增强现象, 特别是 2013 年夏季突然增强很明显, 造成如此强烈太阳光强的原因包括一是积状云的增强效应^[9], 二是 2013 年是太阳活动高峰年造成。据报道从 5 月 12 日至 13 日的 24 h 内, 连续爆发了三次最高强度的耀斑。

那曲紫外线数据记录了超强的紫外线数据,如图 9 和图 10 所示,那曲 2013 年太阳紫外线 A 和紫外线 B 都出现了明显的增强现象。

3 结 论

西藏是地球“第三极”,西藏的大气、太阳辐射等都具有极端的特征和研究意义。我们通过长期观测研究,首次获得了珍贵的西藏地面太阳光谱数据和长期的太阳总辐射和紫外线数据。这些数据反映了西藏大气和地面的宝贵信息。观测的结果为西藏太阳能利用,大气环境研究等提供了实地辐射详细数据。西藏地面太阳紫外线的观测研究已经有十年多的历史,在国内外发表了不少观测研究结果。但是西藏地面太

阳光谱的观测研究才起步,观测时间只有一年多,地点也只有少数几个点,所获得的观测结果也只能代表零星的观测结果,还不能反映西藏高原大面积的光谱特征,有待进一步研究。本次光谱观测数据是两台光谱仪搬到各地观测站进行短期观测的结果,因此没有同步观测的数据。拉萨太阳光谱观测延续性较强,数据较为齐全,每月定期观测拉萨光谱,本文主要报道了拉萨太阳光谱的特征。太阳总辐射观测相对容易,我们在西藏六个地区(拉萨、日喀则、珠峰、阿里、那曲和林芝)建有长期太阳辐射观测站,因此较早就有观测数据,与太阳紫外线观测可以进行同步观测研究。结合太阳光谱研究,报道了藏南代表拉萨和藏北代表那曲的太阳总辐射和太阳紫外线的长期观测结果。

References

- [1] Chen Y C, Norsang G, Pingcuo N, et al. American Institute of Physics Conference Series, 2013, 1531(1): 848.
- [2] JIANG Hai-ling, ZHANG Li-fu, YANG Hang, et al(姜海玲, 张立福, 杨 杭, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(1): 169.
- [3] Ficek D, Dera J, Wozniak B. Oceanologia, 2013, 55: 599.
- [4] WANG Lei-di, LÜ Da-ren, ZHANG Wen-xing(王蕾迪, 吕达仁, 章文星). Plateau Meteorology(高原气象), 2013, 32(2): 315.
- [5] Norsang G, Chen Y C, Pingcuo N, et al. Applied Optics, 2014, 53(4): 736.
- [6] Ciren Nima, Børge Hamre, Øyvind Frette, et al. Hydrobiologia, 2016, 768: 63.
- [7] Norsang G, Kocbach L, Stamnes J J, et al. Applied Physics, Research, 2011, 3: 37.
- [8] ZHOU Yi, DUAN Jie, ZHAO Di, et al(周 毅, 段 杰, 赵 地, 等). Solar Energy(太阳能), 2017, (11): 46.
- [9] Anton M, Piedehierro A, Alados-Arboledas L, et al. Atmos. Res., 2012, 118: 10.

Ground-Based Measurements of Global Solar Radiation and UV Radition in Tibet

Norsang Gelsor, JIN Ya-ming*, Tsoja Wangmu, ZHOU Yi, Sunam Balma, Denggua Tunzhu
Solar UV Lab, Tibet University, Lhasa 850000, China

Abstract The terrestrial solar spectrums record the imprints and information of sunlight passing through the atmosphere, it provides practical information for the study of atmospheric environment and ecological protection. Tibet is one of the world's best-known areas with strongest solar radiation. Observation of solar radiation on the ground in Tibet can provide field data for solar energy utilization and research on atmospheric environment etc.. A systematic field observation was conducted to observe the surface solar spectrums, solar global irradiance and solar UV irradiance in Tibet by using the German RAMSES hyperspectral Irradiance Sensors, the Dutch CMP6 Pyranometers and the Norwegian NILU-UV Multi-filter Radiometers. The monthly spectral characteristics of Lhasa, Tibet, for 2017 were observed. The results of solar spectral observations at the local noons (13:55BJ) of Lhasa for the two equinoxes and the two solstices were reported. The ground spectra of Tibet were compared with the standard spectra of AM1.5 and AM0. The characteristics of global solar irradiance and solar ultraviolet intensity in Lhasa and Naqu of Tibet were observed and studied. It is found that the spectral intensities for visible and infrared lights in summer even exceed the corresponding wavelength spectral intensities of the AM0 spectra in Lhasa. In other words, the spectral intensities for visible and infrared lights on the surface of Lhasa occasionally exceed the spectral intensities of the corresponding radiation at the top of the atmosphere. The maximum spectral value of Lhasa usually occurs at wavelengths of about 476.6 nm, and the maximum observed in summer solstice in 2017 is about $2.331 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$. However, the observation of solar UV radiation (280~400 nm) spectrum shows that the spectral intensity of the ground solar UV region is always significantly lower than that of the corresponding intensity of the AM0 spectrum. Although Lhasa is located at about 3 680 meters above sea level, the

ground measurements of the local noon solar UV spectrums indicate that the wavelengths less than 300 nanometers of UV irradiances are almost zeroes in Lhasa, which means that the solar UV irradiance with wavelengths less than 300 nm is absorbed by the atmosphere and does not reach the ground. It indicates that the short-wave solar UV radiations are absorbed effectively by atmospheric ozone. At the same time, the characteristics of the solar spectra at the high altitude of Tibet and lower places in Beijing and Chengdu are observed and studied, and the information on atmospheric composition and content in various places are revealed. The results of the solar global irradiance in Tibet during July of 2010—December of 2013 are reported. The results show that about 18% of the global irradiances in Lhasa exceed the solar constant ($1\,367\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$). It is found that the instantaneous maximum value of the global irradiance in Lhasa reaches $1\,756.09\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (June 24, 2011). The observation results of solar UV radiation in Tibet during July of 2008—December of 2013 are also reported. The results show that the averaged daily maximum value of UVA for both Lhasa and Naqu is about $67\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, and the maximum value of UVB for the same places is about $5.1\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. The daily maximum values of UVA and UVB for both Lhasa and Naqu are maintained a good consistency. During the observation period of more than 5 years, there was no obvious enhancement or weakening trend for the UV intensities.

Keywords Tibet; Solar spectrum; Global irradiance; Solar UV irradiance

(Received May 7, 2018; accepted Oct. 12, 2018)

* Corresponding author