

· 极端环境光学与技术应用 ·

太阳光谱辐照度天地一体化观测与比对研究

韩文耀^{1,2}, 黄煜¹, 李乐¹, 李占峰¹, 顾国超¹, 杨小虎¹, 黄富祥³, 王彪¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中国气象局, 国家卫星气象中心, 北京 100081

摘要: 为了实现对太阳辐射的天地一体化观测, 提高对大气的精细化监测水平, 将风云三号 E 星太阳辐照度光谱仪和地基光谱型太阳光度计的太阳辐照度光谱数据进行对比。结果表明: 在地基波长精度 $\pm 0.3 \text{ nm}$ 的误差范围内, 天基设备与地基设备的波长具有较好的一致性; 利用天基数据和大气辐射传输模型计算出地面太阳直射的光谱辐照度, 并将其与地基设备观测的数据进行对比, 误差小于 $0.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$, 验证了天基设备的光谱辐照度数据的准确性。在此基础上, 根据 Beer-Lambert-Bouguer 定律, 运用天基与地基的观测数据, 对长春市大气气溶胶光学厚度和 Ångström 波长指数进行反演分析, 结果表明: 长春市城区与郊区气溶胶类型有着明显的差异, 城区气溶胶类型符合城市-工业气溶胶, 郊区空气质量优于城区。

关键词: 天地一体化; 太阳光谱; 气溶胶光学厚度; Ångström 波长指数

中图分类号: O432.2; P414; X831 文献标识码: A doi: 10.14016/j.cnki.jgzz.2022.10.012

Integrated observation, comparison, and study of solar spectral irradiance with space-based monitor and ground-based monitor

HAN Wenyao^{1,2}, HUANG Yu¹, LI Yue¹, LI Zhanfeng¹, GU Guochao¹,
YANG Xiaohu¹, HUANG Fuxiang³, WANG Biao¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract: In order to realize the Space-Earth Integration observation of solar radiation, and improve the level of fine monitoring of the atmosphere, compare the solar irradiance spectral data of Fengyun-3E solar spectral irradiance monitor and ground-based spectrophotometer. The results show that within the error range of $\pm 0.3 \text{ nm}$ of ground-based wavelength accuracy, the wavelengths of space-based equipment and ground-based equipment have good consistency. The spectral irradiance of direct sunlight on the ground was calculated by using space-based data and atmospheric radiation transmission models, and compared with the data observed by ground-based equipment, the error was less than $0.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$, which verified the accuracy of the spectral irradiance data of space-based equipment. On this basis, according to the Beer-Lambert-Bouguer law, the optical thickness of atmospheric aerosols and the Ångström wavelength exponent in Changchun were inverted and analyzed by using space-based and ground-based observational data. The results show that there are obvious differences between the types of aerosols in the urban areas of Changchun City and the suburbs, and the types of aerosols in the urban areas are in line with the urban-industrial aerosols, and the air quality in the suburbs is better than that in the urban areas.

Key words: space-earth integration; solar spectrum; aerosol optical depth; Ångström wavelength exponent

收稿日期: 2022-05-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助 (No. 62005268)、吉林省与中国科学院科技合作高技术产业化专项资金项目 (No. 2021SYHZ0012)

作者简介: 韩文耀 (1998-), 男, 硕士, 主要从事空间紫外遥感与辐射计量方面的研究。E-mail: hanwenyao20@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 黄煜 (1979-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间紫外遥感与辐射计量方面的研究。E-mail: ssshycn@yahoo.com.cn

<http://www.laserjournal.cn>

1 引言

太阳辐射是地球生物系统、大气系统最重要的能量来源。对太阳高光谱观测有助于科学家对太阳表面黑子、耀斑的研究与预测,还可以优化当前的大气气候模型以及对太阳能资源的评估等问题^[1-2],该研究对太阳物理、气象、太阳能资源和环境科学等领域有着重要意义。

国外从上世纪 70 年代开始对星载太阳光谱辐照度观测仪器进行研究,随着近五十年的发展,美国宇航局(NASA)在 2017 年发射了太阳光谱辐照度总传感器 TSIS-1,该仪器实现了对太阳高光谱、宽谱段的辐照度信息观测^[3-4]。国外目前较为成熟的地基太阳辐照度观测产品,如法国的 CE-318 型太阳光度计,该仪器应用于 NASA 与多家机构联合在全球建立的气溶胶观测网(AERONET)^[5],该网络在全世界已分布有 500 多个站点,用于监测全球大气气溶胶的分布与变化,以及对卫星大气反演参数进行验证^[6]。

国内近些年对太阳光谱的研究发展迅速,随着 2021 年 7 月份我国风云三号 E 星的成功发射,该卫星所携带的紫外-可见-近红外波段太阳辐照度光谱仪已在轨业务化工作,标志着我国空间太阳精细化光谱辐射观测信息实现国产化^[7]。国产的地基太阳光谱辐照度观测设备目前处于研发和测试阶段。中国气象局协同多个部门正在建立天地一体化空间气象监测平台,联合多台天基和地基设备实现对太阳和大气的重要参数的业务化监测,将卫星观测和地基遥感观测作为一个整体,相互验证、比对与校准,推进我国空间大气气象监测科学的发展^[8-9]。

基于我国现有的背景,通过大气辐射传输模型,利用风云三号 E 星太阳辐照度光谱仪所观测的太阳光谱辐照度数据模拟出地面所接收的太阳光谱,与自研的地基光谱型太阳光度计所观测的太阳光谱的辐照度和波长进行比对,验证天基设备与地基设备对太阳光谱测量的一致性;最后在长春地区对太阳辐照度天地一体化观测,并实现对气溶胶参数的简要反演。

2 光谱数据处理

由于天基太阳辐照度光谱仪在紫外到可见光波段具有较高的光谱分辨率,与地基光谱数据差异较大,可将天基太阳辐照度光谱仪的光谱与地基太阳光度计光谱仪的狭缝函数进行卷积^[10],对卷积后的太阳光谱进行积分取平均,得出的光谱与地基太阳光度计的测量光谱的光谱分辨率匹配。设风云三号太阳辐照度光谱仪测得的光谱为 $S(\lambda)$,地基太阳光度计

的归一化狭缝函数为

$$f(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\lambda-\lambda_0)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

其中, λ_0 为中心波长, σ 与仪器谱线半高宽度(FMHW)满足 $\text{FMHW} = 5.545\,177\sigma$ 。处理后的太阳辐照度光谱仪的光谱表示为

$$S_i(\lambda_i) = \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_i-\Delta\lambda/2}^{\lambda_i+\Delta\lambda/2} S(\lambda) * f(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

其中, λ_i 为地基光谱第 i 个波长,将其作为中心波长, $\Delta\lambda$ 为中心波长所占的带宽。

所使用的地基太阳光谱观测仪器为自研的光谱型太阳光度计,该仪器可观测的太阳光谱范围为 400 nm~1 000 nm,且具有 1.5 nm 的光谱分辨率和 0.6 nm 的波长采样带宽,波长精度为 ± 0.3 nm。已在实验室采用国家计量院标准石英卤钨灯对该仪器完成辐照度定标,定标不确定度小于 2%,通过(1)式计算出光谱型太阳光度计的归一化狭缝函数为

$$f(\lambda) = \frac{1}{0.678\,1} \exp\left[-\frac{(\lambda-\lambda_0)^2}{0.146\,3}\right] \quad (3)$$

选取 2022 年 5 月 20 日风云三号太阳辐照度光谱仪的观测数据,对 400 nm~1 000 nm 波段光谱数据根据(2)式卷积并在中心波长带宽 $\Delta\lambda = 1.5$ nm 内积分取平均,计算得到的光谱与原始光谱的分布如图 1 所示。

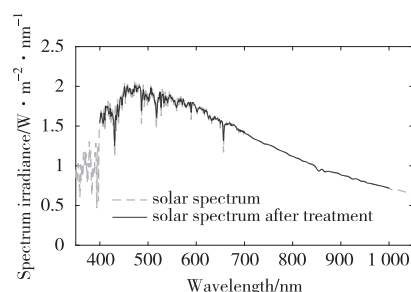


图 1 处理后的太阳光谱

3 天地太阳光谱数据比对

3.1 波长一致性比对

在 5 月 20 日的天基和地基太阳辐照度光谱观测数据中分别选出三个元素吸收波谷来分析天基和地基光谱数据波长的偏差,将所选的波谷数据点采用高斯拟合来确定中心波长的位置,如图 2 所示,图(a)和(b)、(c)和(d)、(e)和(f)中天基和地基光谱数据中心波长的偏差分别为 0.236 nm、0.117 nm、0.233 nm,由于地基太阳光度计的波长精度为 ± 0.3 nm,中心波长数据的偏差均在误差范围内,表明地基与天基太阳

光谱的波长具有较好的一致性。

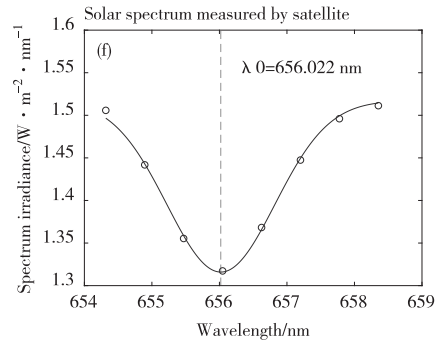
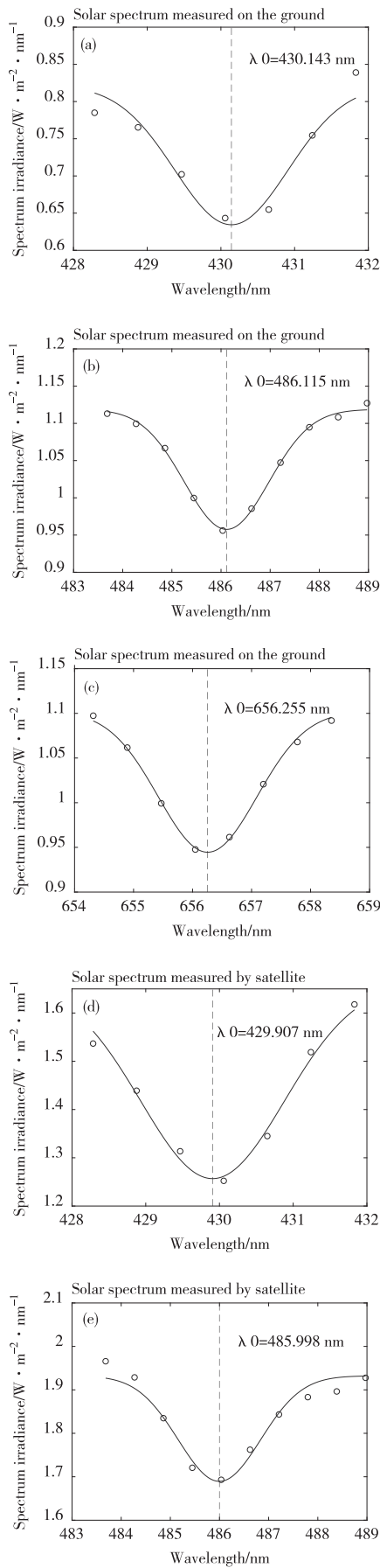
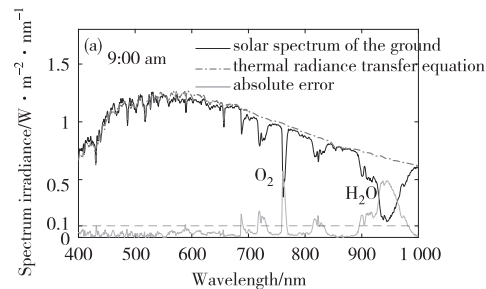


图2 不同波段数据拟合曲线

3.2 光谱辐照度一致性比对

由于地基太阳光度计所测得的太阳直射辐射经过了大气气体分子和大气气溶胶的吸收和散射,光谱强度分布出现了不同程度的衰减和吸收峰,无法直接比对。采用大气传输模型对风云三号太阳辐照度光谱仪所测得的太阳光谱数据进行处理,得到地面上的太阳光谱辐射的理论计算值,然后再对太阳光谱的辐照值以及光谱的准确性进行比对。

为了便于数据处理,在运用大气辐射传输模型计算太阳辐射通过大气到达地面的辐照度值时,只考虑大气瑞利散射和米氏散射对太阳辐射的衰减,不考虑水汽、氧气等气体的吸收作用带来的衰减,大气吸收产生的透过率设为1。通过设置大气压强、海拔高度、天顶角和城市气溶胶类型等参数,将处理后的5月20号的天基数据代入该模型,计算出不同时刻的地面太阳光谱辐照度分布,并与当地地基光谱型太阳光度计实测数据进行比对。如图3所示,可以发现,除了水汽和氧气等吸收波段,不同时刻的地基观测光谱与通过大气辐射模型计算出的光谱具有较好的一致性,在非气体吸收波段光谱辐照度绝对误差均小于0.1 W·m⁻²·nm⁻¹,大部分波段光谱辐照度绝对误差小于0.05 W·m⁻²·nm⁻¹,由于地基太阳光谱辐照度观测数据的不确定度为2%,大气传输模型计算的不确定度为10%,除气体吸收波段外,大部分波段光谱辐照度数据比对所得出的绝对误差在该不确定度范围内,表明了天基光谱辐照度数值具有较高的准确性。



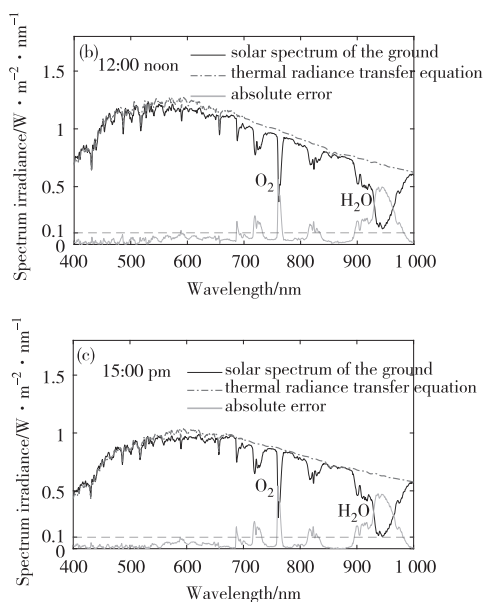


图3 不同时刻太阳光谱对比

4 天地一体化观测数据反演分析

根据上述比对结果可知,风云三号太阳辐照度光谱仪在轨观测数据与地基光谱型太阳光度计观测数据的光谱辐照度和波长具有较好的匹配特性,故可以将天基太阳光谱数据作为大气层顶的太阳光谱的标准值,结合地基太阳光度计观测数据进行高精度大气成分反演,实现天地一体化气象观测。本文以2022年5月20日长春市太阳光度计观测数据为例,通过天地一体化观测结果对长春市大气气溶胶参数进行反演分析。

地基设备实验观测地点经纬度为 $43^{\circ}50'34''\text{N}$, $125^{\circ}23'50''\text{E}$,海拔高度300 m,观测地点为长春市城区外环,光度计跟踪太阳可对长春市城区和郊区大气气溶胶进行观测,测量结果可用于分析大气气溶胶的空间分布特征。将天基观测数据作为大气层顶参考光谱,基于 Beer-Lambert-Bouguer 定律,计算出非气体吸收波段的大气气溶胶光学厚度(AOD)。根据 Ångström 公式^[11]可以拟合出所有波段的 AOD 数值和气溶胶粒子特性,AOD 与 λ 满足:

$$\tau_a(\lambda) = \beta \cdot \lambda^{-\alpha} \quad (4)$$

式中, α 为波长指数,用来衡量气溶胶粒子的尺寸, β 反映大气浑浊程度,D Tanré 等人^[12]对不同的 α 和 β 值对应的气溶胶类型作了具体分析。

图4显示了当天不同时刻450 nm、550 nm、650 nm、850 nm波段的AOD,可以发现,对于不同波段虽然AOD大小不同,但在时间维度上的变化规律相同,在8:13~10:53时段内,无风无云的干扰,AOD变化波动较小,在空间分布上,此时太阳光度计观测

区域为长春市郊区,该区域人类活动影响较小,植被覆盖面积大,大气质量良好,AOD水平较低且稳定;在10:53~16:37时段,观测区域转移到城市地区,受城市人类活动和工业排放增加,以及薄云的影响,AOD水平有着明显的升高和波动;在15:49~16:37时段,由于气温的骤降,大气气溶胶粒子开始沉降,AOD有着明显下降趋势。

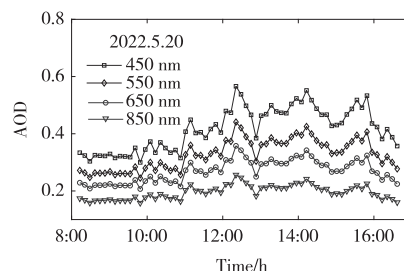


图4 不同波长处 AOD 的日征变化

利用 Ångström 关系式反演出的波长指数 α 和大气浑浊度 β 在一天中的变化如图5(a)、(b)所示。其中 α 数值在上午8:13~10:53时段较为稳定,与AOD变化规律相同,其数值在1~1.1之间,说明郊区大气气溶胶大粒子和小粒子均占有一定的比例,小粒子气溶胶多为人类活动所排放,大粒子气溶胶大多是植被产生的生物气溶胶^[13];在10:53~16:37时段对城区持续测量中, α 值先持续上升,表明城区细粒气溶胶粒子数量增多,气溶胶的主要来源为汽车尾气排放和工业排放,在15:49达到最大值1.3,之后气温逐渐降低,气溶胶沉降导致 α 数值减小。 β 值衡量大气气溶胶的浓度,对比图4、5(b)可以发现,其随时间的变化规律与AOD变化具有一致性。郊区数值在0.13~0.16之间浮动,城区数值在0.13~0.21之间浮动,说明当天大气轻度浑浊,郊区大气质量明显优于城区。

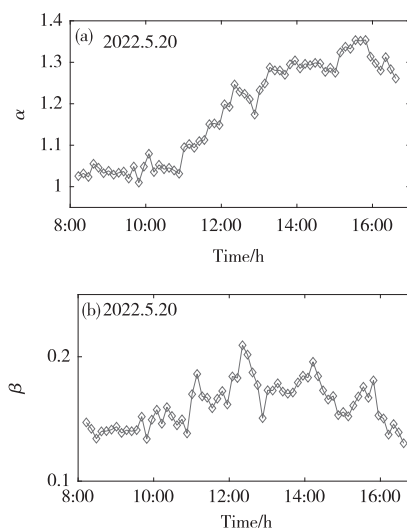


图5 (a) Ångström 波长指数的日征变化,(b) 大气浑浊度的日征变化

5 结论与展望

通过对比风云三号 E 星太阳辐照度光谱仪和地基光谱型太阳光度计对太阳光谱的观测数据,得出天基与地基光谱波长偏差均小于 0.3 nm,满足地基设备的波长精度 ± 0.3 nm,表明了天基与地基仪器的太阳光谱波长一致性满足需求。利用大气辐射传输模型反演出的地面太阳光谱辐照度值与地基太阳光度计观测的光谱辐照度值在非气体吸收波段的差异均小于 $0.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$,天基与地基观测数据一致性优秀,实现了观测结果的相互验证。

将天基光谱数据作为大气层顶的太阳光谱参考值,结合地基太阳光度计观测数据对大气气溶胶参数反演,结果表明长春市城区符合城市-工业型气溶胶类型,郊区大气质量优于城区。该观测结果表明将天基与地基设备结合实现天地一体化大气监测具有实际意义。

目前所用的地基设备的光谱范围仍具有扩展潜力,后期将开发出光谱范围更宽、光谱分辨率更高的地基太阳光谱观测设备,将该设备应用于对太阳辐射的天地一体化观测,实现对大气臭氧、水汽、二氧化碳、气溶胶等多种参数的高精度反演。

参考文献

- [1] Benkhoff J, Van Casteren J, Hayakawa H, et al. BepiColombo—Comprehensive exploration of Mercury: Mission overview and science goals[J]. Planetary and Space Science, 2010, 58(1-2): 2-20.
- [2] Ahmed R, Sreeram V, Mishra Y, et al. A review and evaluation of the state-of-the-art in PV solar power forecasting: Techniques and optimization[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 124: 109792.
- [3] 范唯唯. ISS 开展 TSIS-1 实验测量太阳辐照度[J]. 空间科学学报, 2018, 38(02): 135.
- [4] Richard E, Harber D, Coddington O, et al. SI-traceable spectral irradiance radiometric characterization and absolute calibration of the TSIS - 1 Spectral Irradiance Monitor (SIM)[J]. Remote Sensing, 2020, 12(11): 1818.
- [5] Estellés V, Campanelli M, Smyth T J, et al. Evaluation of the new ESR network software for the retrieval of direct sun products from CIMEL CE318 and PREDE POM01 sun-sky radiometers [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, 12(23): 11619-11630.
- [6] C A Babu, P Sivaprasad. Analysis of the aerosol and the ozone observations at a southwest peninsular coastal station using microtops sunphotometer[J]. Indian Journal of Physics, 2019, 93(6): 701-705.
- [7] 雷宽,李乐,黄煜,等. 风云三号黎明星太阳辐照度光谱仪系统噪声与稳定性分析[J]. 激光杂志, 2022, 43(04): 17-22.
- [8] 王亮,李慧,紧密结合服务导向和用户需求推进空间天气业务高质量发展[N]. 中国气象报, 2022, 02(17): 001.
- [9] 黄雄豪. 高精度太阳直射光谱辐照度仪的研制[D]. 安徽:中国科学技术大学, 2021.
- [10] 李占峰,王淑荣,黄煜,等. 紫外臭氧垂直探测仪高精度在轨光谱定标方法研究[J]. 光学学报, 2013, 33(02): 236-240.
- [11] Liu C, Chung C E, Yin Y, et al. The absorption Ångström exponent of black carbon: from numerical aspects[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(9): 6259-6273.
- [12] D Tanré, Kaufman Y J, Holben B N, et al. Climatology of dust aerosol size distribution and optical properties derived from remotely sensed data in the solar spectrum[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2001, 106(D16): 18205-18217.
- [13] Yli-Juuti T, Mielonen T, Heikkinen L, et al. Significance of the organic aerosol driven climate feedback in the boreal area[J]. Nature communications, 2021, 12(1): 1-9.