

太阳紫外辐射光谱的光学多道探测与分析

赵晓艳, 何捷*, 左浩毅, 梁慧敏, 杨经国

四川大学物理系, 四川 成都 610064

摘要 报道了自行研制的紫外 CCD 光学多道分析器及其在太阳紫外辐射光谱探测中的实际应用。紫外多道分析器光谱探测范围 200 ~ 1 100 nm, 光谱分辨率 0.1 nm, 光谱探测灵敏度 0.02 lx。进行了成都地区 UVA 和 UVB 波段太阳紫外辐射光谱的实时探测, 与常规的太阳紫外辐射探测仪器测量结果进行了对比, 得到很好的相关。对所探测的太阳紫外辐射光谱进行的初步分析表明: 太阳紫外辐射在一天内早晚小、中午大, 与太阳天顶角(SZA)变化呈相反相关。UVB 和 UVA 波段内不同波段的辐射量不同, 长波段的辐射量一般比短波段的辐射量大。云和气溶胶对紫外辐射有重要影响, 云对不同波长的辐射衰减不同。

关键词 太阳紫外光谱; CCD 光学多道分析器; UVA; UVB

中图分类号 P182.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0593(2007)05-0846-04

引言

地球表面太阳辐射由紫外区的 280 nm 到红外区的 1 800 nm 构成, 其中紫外(UV)波段辐射能量约占太阳辐射总能量的 3%。虽然 UV 辐射所占的比例很小, 但其强度的变化可以导致极大的环境效应和生物效应。太阳紫外辐射可分为三个不同的波段: UVC(200 ~ 280 nm), 称“杀菌区”, 基本上被高层臭氧吸收, 难于到达地面。UVB(280 ~ 315 nm)段称为“皮肤红斑区”, UVB 波段辐射对人体健康有十分重要的影响, 同时影响农作物生长。UVA(315 ~ 400 nm)波段又称“黑光区”, 可诱发很多物质发出荧光, 对动植物生长存在重要影响。近年来的很多研究发现, 臭氧层的衰减导致地面紫外辐射增强, 过多的紫外辐射(特别是 UVB 波段的辐射)会使人的免疫系统受到抑制, 导致皮肤癌和白内障病人增加, 人类爆发传染病次数增加^[1, 2]。太阳紫外辐射状况的实时监测越来越受到人们的广泛关注。

太阳紫外辐射光谱由大气层上界的太阳辐射光谱经大气中的气体(氮, 氧, 臭氧, 二氧化氮, 二氧化硫等)吸收, 空气分子、气溶胶等散射, 云的吸收和散射, 地表反照等综合因素作用之后得到, 其中臭氧对地面太阳紫外辐射光谱组成的改变具有重要的意义。太阳天顶角(SZA)变化是地面太阳紫外辐射变化的决定因素。臭氧总量及其垂直分布是影响地面太阳紫外辐射最重要的因素, 而云和气溶胶是影响地面太阳紫外辐射的另外两大因素^[3]。

目前, 太阳紫外辐射探测主要是采用滤色片式的分波段总量测量, 其中一类为宽波段(280 ~ 315 nm 的 UVB 波段, 和 315 ~ 400 nm 的 UVA 波段)通带滤光片式的紫外辐射表(如型号为 TBQ-ZW-2 的紫外辐射表), 该类仪器可用于测量 UVA 和 UVB 波段总辐射量^[4, 5]。第二类紫外辐射探测仪器使用窄带滤光片组合, 可获得更细的分波段太阳紫外辐射光谱, 每一分波段带宽在 10 nm 左右。为了进一步研究太阳紫外辐射的生物学效应, 特别是研究不同波长太阳紫外辐射对人体细胞、组织的不同影响, 需要对太阳紫外辐射光谱进行更精确测量。冯志庆等^[6], 刁丽军等^[7]使用光栅光谱仪分光、光电倍增管接收, 测量了太阳紫外辐射光谱。使用光电倍增管接收方法及光栅扫描, 难以实现光谱的同时实时探测。使用阵列 CCD 探测器组建的光学多道分析器(OMA)是实时快速测量光谱的强有力手段, 已经在可见和近红外波段得到大量应用^[8, 9]。利用紫外响应 CCD 探测器可以构成紫外多道式光学多道分析器, 实现对太阳紫外辐射光谱的实时快速高精度测量。

本文报道使用紫外 CCD 探测器组建的紫外 CCD 光学多道分析器, 以及在太阳紫外辐射光谱探测中的实际应用。

1 实验装置

紫外 CCD 光学多道分析器基本结构如图 1, 主要由光纤连接器(由石英透镜 P, 可变光阑 L 和导光石英光纤 F 组成), 光栅多色仪 G, 紫外 CCD 探测器(CCD, EG&G RETR-

收稿日期: 2005-12-29, 修订日期: 2006-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(60478044, 10475058)资助

作者简介: 赵晓艳, 1975 年生, 四川大学物理学院在读研究生

*通讯联系人

e-mail: schjdexx@sohu.com

CON RL2048DKQ), CCD 驱动电源 (CCD driver), A/D 转换器 (A/D) 和微型计算机 (MCP) 组成。RL2048DKQ 紫外 CCD 探测器光谱响应范围 200 ~ 1 100 nm, 光谱探测灵敏度 0.02 lx。

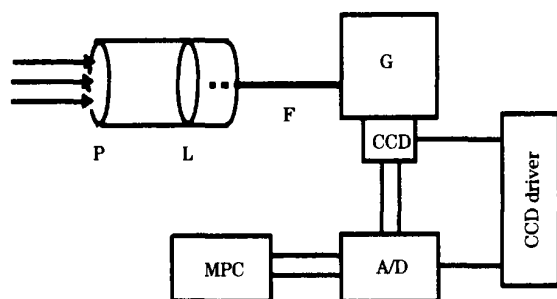


Fig 1 Instrument for solar ultraviolet irradiance spectra

太阳辐射经光纤连接器耦合太阳紫外辐射进入光栅多色仪 (狭缝宽 0.2 mm), 经光栅分光, 光谱图像被成像于光谱仪焦平面, CCD 器件转换光谱图像信号为相应的电信号, 在专用驱动电源支持下, CCD 输出信号经放大, 采样保持, 模数变换 (A/D 转换器, AC1077, 16bit, 变换时间 10 μ s), 进入专用微机 (MPC)。Visual C++ 编程的专用应用软件用于系统控制, 实现太阳紫外辐射光谱的采集分析。所研制的紫外 CCD 光学多道分析器应用于太阳紫外光谱采集时, 一次采集紫外光谱范围: 280 ~ 400 nm, 光谱分辨率为 0.05 nm $\cdot$ pixel⁻¹。多道分析器光谱波长用紫外 Hg 光谱灯谱线 313.0 和 365.0 nm 校正, 光谱强度由该 CCD 器件光谱响应曲线校正。

2 测量与分析

图 2 为于 2005 年 11 月 19 日在成都四川大学校园内所测太阳紫外辐射光谱, 光谱波长已用图 3 所示标准 Hg 光谱校正, 光谱强度已用 CCD 器件光谱响应曲线校正。对 2005 年 11 月 19 日、25 日、28 日, 12 月 2 日、3 日太阳紫外辐射光谱进行了监测, 除 25 日天气晴朗少云外其它天都是晴天多云, 同时用 TBQ-ZW-2 型紫外辐射表进行了总 UVB 在 1 min 内的累计测量。

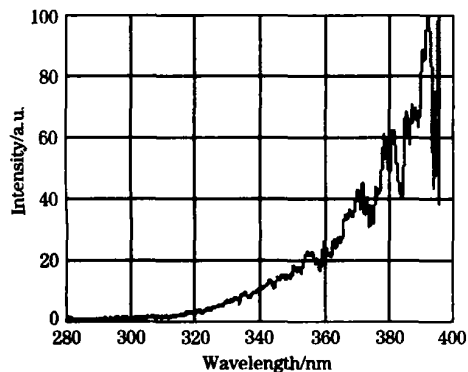


Fig 2 Solar ultraviolet irradiance spectrum

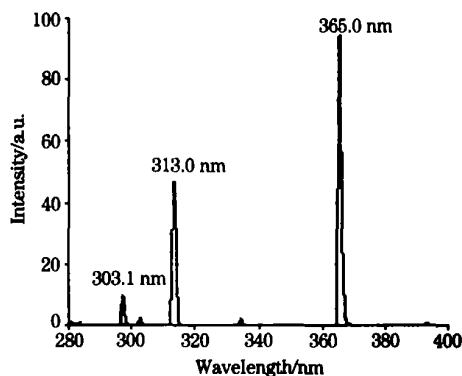


Fig 3 The spectrum lines of ultraviolet Hg lamp

对 2005 年 11 月 25 日和 12 月 3 日所采集的光谱在 UVB 波段内进行积分 (简称积分 UVB), 其积分 UVB 辐射量随时间的变化趋势分别如图 4(a) 中有菱形标志的曲线和图 4(b) 中有菱形标志的曲线所示。以测量结果可见, 一天之内太阳紫外辐射量在不断变化, 由图 4(a) 知, 从早上到中午随着 SZA 的减小积分 UVB 辐射量逐渐增大, 由中午到下午, 随着 SZA 的增大积分 UVB 辐射量逐渐减小。2005 年 11 月 25 日 10:15 积分 UVB 辐射量最小, 13:40 达到最大值; 2005 年 12 月 3 日 9:50 积分 UVB 辐射量最小, 11:50 积分 UVB 辐射量达到最大值。11:30 及 13:00 左右积分 UVB 辐射量曲线上出现了“下凹”, 据数据记录这时天空有云, “下凹”就是云衰减太阳紫外辐射的结果。综合这两天的监测可知: 在一天之内太阳紫外辐射具有早晚小、中午大的规律, 与 SZA 变化呈相反相关, 这是因为 SZA 越小时, 太阳紫外辐射在大气中穿过的路径越短, 被大气分子, 气溶胶, 云等吸收和散射的辐射量越少, 而云等可以影响这种规律性; 由于成都地区多云, 2005 年 12 月 3 日地面太阳紫外辐射比 11 月 25 日弱。

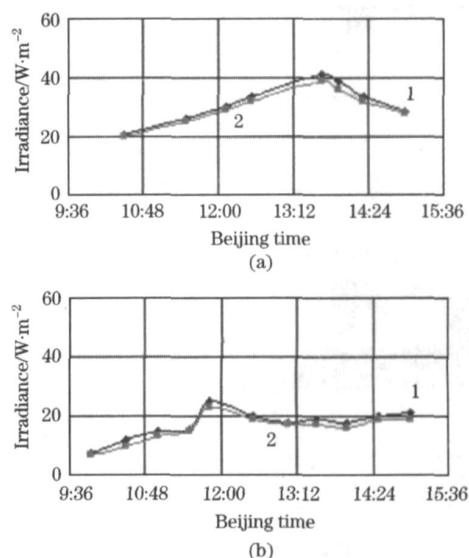


Fig 4 The comparison of results

(a): November 25, 2005; (b): December 3, 2005

1: Integral UVB; 2: Total UVB

进行了与紫外辐射表测量结果的比对测量, 将 2005 年 11 月 25 日和 12 月 3 日应用 TBQ-ZW-2 型紫外辐射表测量的总 UVB 辐射量 (简称总 UVB) 随时间的变化趋势示于图 4 (a) 中有方块标志的曲线和图 4 (b) 中有方块标志的曲线。11 月 25 日 10:15 总 UVB 辐射量最小为 $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 13:40 达到最大值 $39 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$; 12 月 3 日 9:50 总 UVB 最小值为 $7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 11:50 为最大值 $23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 11:30 及 13:00 左右总 UVB 辐射量曲线上也出现了“下凹”。综合测量结果可知: 积分 UVB 辐射量随时间增大或减小的变化趋势与紫外辐射表总 UVB 辐射量随时间增大或减小的变化趋势相当的一致, 说明紫外光学多道分析器的监测结果和紫外辐射表的测量结果具有很好的相关性。

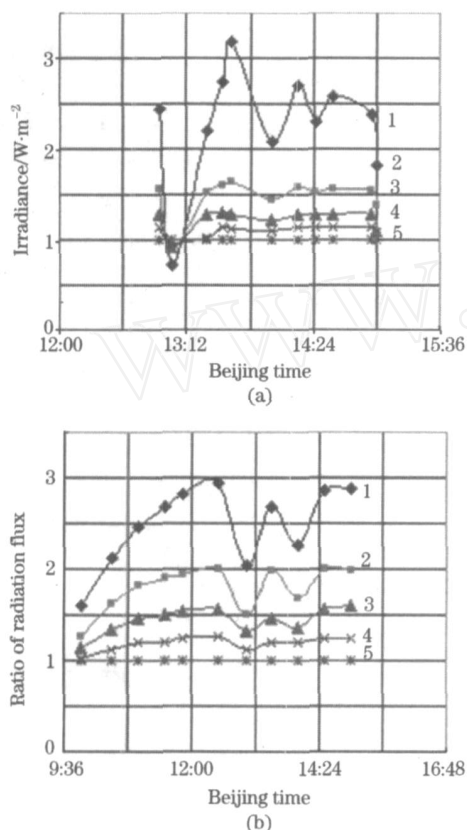


Fig 5 The comparison of results

(a): December 2, 2005; (b): December 3, 2005

1: $(334)/(284)$; 2: $(314)/(284)$; 3: $(304)/(284)$;

4: $(294)/(284)$; 5: $(284)/(284)$

为了更精确地研究太阳紫外光谱随时间的变化规律, 将采集的光谱以 10 nm 的带宽积分。图 5(a) 和图 5(b) 分别为 2005 年 12 月 2 日和 12 月 3 日多道分析器的监测结果。图中的曲线为 $280 \sim 289$, $290 \sim 299$, $300 \sim 309$, $310 \sim 319$ 和 $330 \sim 339 \text{ nm}$ 五个分波段的积分辐射量相对于 $280 \sim 289 \text{ nm}$ 分

波段积分辐射量的比值随时间的变化情况 (上述五个分波段积分辐射量依次分别简记为 284, 294, 304, 314 和 334), 例如, $330 \sim 339 \text{ nm}$ 的积分辐射量相对于 $280 \sim 289 \text{ nm}$ 分波段的积分辐射量的比值标记为 $334/284$ 。由图 5(a) 和图 5(b) 可知, 各分波段积分辐射量随时间变化趋势基本相同, 但各分波段变化的幅度不同且相差较大。由图可见 12 月 2 日 13:38 时刻, $290 \sim 299 \text{ nm}$ 分波段积分辐射量是 $280 \sim 289 \text{ nm}$ 分波段积分辐射量的 1.13 倍, $300 \sim 309 \text{ nm}$ 分波段积分辐射量是 $280 \sim 289 \text{ nm}$ 分波段积分辐射量的 1.28 倍, $310 \sim 319 \text{ nm}$ 分波段积分辐射量是 $280 \sim 289 \text{ nm}$ 分波段积分辐射量的 1.64 倍, $330 \sim 339 \text{ nm}$ 分波段积分辐射量是 $280 \sim 289 \text{ nm}$ 分波段积分辐射量的 3.2 倍。由比值可知 $330 \sim 339 \text{ nm}$ 分波段积分辐射量最大, $310 \sim 319 \text{ nm}$ 分波段积分辐射量次之, $290 \sim 299 \text{ nm}$ 分波段积分辐射量较小, $280 \sim 289 \text{ nm}$ 分波段积分辐射量最小。这是臭氧对短波长的紫外辐射有更强烈吸收。结合图 2 中的地面太阳紫外辐射光谱类推可知对整个紫外波段来说, 长波紫外辐射量比短波紫外辐射量大得多也即 UVA 的辐射量比 UVB 的辐射量大得多。这两幅图中也出现了类似图 4(b) 中出现的“下凹”, 是云对紫外辐射影响的结果, 不过, 从图可知云对不同波段的衰减情况不同, 长波衰减度大, 短波衰减度小。

3 结论与讨论

应用所研制的紫外 CCD 光学多道分析器成功的测量了太阳紫外辐射光谱, 紫外 CCD 光学多道分析器不仅能够用于监测太阳紫外辐射 UVA 和 UVB 波段总辐射量, 而且可以精确分析各波长的辐射量, 以及在不同大气状况下各波长辐射量的相对变化情况, 为进一步研究太阳紫外辐射的环境效应和生物效应奠定了基础。

从测量结果可知, 太阳紫外辐射在一天内的变化规律为: 从早上到中午, 随着太阳天顶角的逐渐减小紫外辐射量逐渐增大, 在太阳时中午 (13:30 左右) 辐射达到最大, 从中午到下午随着太阳天顶角的逐渐增大各波长的紫外辐射量逐渐减小。但是云量和气溶胶的变化对紫外辐射有重要影响。

紫外 CCD 光学多道分析器能同时监测 UVB 和 UVA 波段太阳紫外辐射变化, 不同波段的辐射量不同, 长波段的辐射量比短波段的辐射量大, 这是由于臭氧对短波段辐射的吸收更强烈。云量对不同波长的辐射衰减不同, 关于云对紫外辐射衰减的分析将另文讨论。

太阳紫外辐射光谱是由大气层上界的太阳辐射光谱经大气中的气体 (臭氧, 氧, 二氧化氮, 二氧化硫等) 吸收, 空气分子、气溶胶等散射, 云的吸收和散射地表反照等综合因素作用之后得到, 应用太阳紫外辐射光谱测量结果还可反演大气中臭氧、二氧化硫等微量气体浓度。

参 考 文 献

- [1] GUO Shi-chang, YI Fang, CHEN Hui, et al(郭世昌, 仪方, 陈辉, 等). China Environmental Science(中国环境科学), 2001, 21(1): 24.
- [2] United Nations Environment Programme, World Health Organization, International Radiation Protection Association(联合国环境规划署, 世界卫生组织, 国际辐射防护协会). Environmental Health Criteria 14: Ultraviolet Radiation(环境卫生基准(14)紫外辐射). Beijing: China Environmental Science(北京: 中国环境科学出版社), 1992.
- [3] WANG Purcai, WU Bei-ying, ZHANG Wen-xing(王普才, 吴北婴, 章文星). Chinese Journal of Atmospheric(大气科学), 1999, 23(1): 1.
- [4] Frederick J E. Photochem. Photobiol., 1992, 56: 113.
- [5] Frederick J E, Weatherhead E C. Photochem. Photobiol., 1992, 56: 123.
- [6] FENG Zhi-qing, LI Furtian(冯志庆, 李福田). Journal of Test and Measurement Technology(测试技术学报), 2004, 18(4): 292.
- [7] DIAO Li-jun, GU Song-shan, WANG Purcai, et al(刁丽军, 顾松山, 王普才, 等). Scientia Meteorologica Sinica(气象科学), 2003, 23: 22.
- [8] YANG Jing-guo, JIANG Hong-wei, XUE Kang, et al(杨经国, 姜宏伟, 薛康, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 1991, 11(6): 19.
- [9] HE Ying-hong, CHENG Juan, RAN Rui-jiang, et al(贺应红, 程娟, 冉瑞江, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2004, 24(5): 624.

Optical Multi-Channel Detection and Analysis on Solar Ultra-Violet Irradiance Spectrum

ZHAO Xiao-yan, HE Jie*, ZUO Hao-yi, LIANG Hui-min, YANG Jing-guo

Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Abstract The present paper reports a new type of ultraviolet CCD optical multi-channel analyzer and its application to detecting solar ultraviolet irradiance spectrum. Spectral detecting range of 200-1100 nm, spectral resolution of 0.1 nm and detecting sensitivity of 0.02 lx were reached in this instrument. The solar spectra of UVB and UVA were measured in real time in Chengdu area. The measurement results have good correlation with the detection using normal solar ultraviolet irradiance detector. Primary analysis on the detection results of solar spectra in UVB and UVA indicated that in the morning and in the afternoon the irradiance of solar ultraviolet is smaller than that at noon, and reverse correlation holds for the change of SZA (Solar Zenith Angle). In different wavelength interval of UVA and UVB, generally, the radiation flux of long wavelength is greater than that of short. Clouds and aerosols in the atmosphere have important influence on ultraviolet irradiance.

Keywords Solar ultraviolet spectrum; CCD optical multi channel analyzer(OMA); UVA; UVB

(Received Dec. 29, 2005; accepted Mar. 28, 2006)

* Corresponding author