

胡波, 王跃思, 刘广仁. 2010. 太阳紫外/光合有效辐射表标定方法探讨 [J]. 气候与环境研究, 15 (2): 210–216. Hu Bo, Wang Yuesi, Liu Guangren. 2010. A study of ultraviolet and photosynthetically active radiation pyranometer calibration method [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (2): 210–216.

太阳紫外/光合有效辐射表标定方法探讨

胡波 王跃思 刘广仁

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘要 平流层臭氧层变薄导致地面紫外辐射增加, 紫外辐射的生态、气候学及环境效应使太阳紫外辐射的观测研究逐渐成为辐射研究的前沿问题。地基紫外辐射联网观测是获得紫外辐射时空分布的基础, 而定期进行辐射表的标定是获取正确的、具有可比性的观测数据的基本保证。利用 USB 2000 紫外/可见辐射光谱仪, 采用标准灯传递能量的标定方法建立了紫外辐射表和光合有效辐射表标定系统, 标定后的紫外辐射表不确定度为 5%, 光合有效辐射表不确定度为 5%, 能够很好地满足世界气象组织标准。该标定方法简单易行、运行费用低且精度较高, 能够很好地进行中国辐射观测网中紫外与光合有效辐射表的标定工作。

关键词 紫外辐射表 光合有效辐射表 标定

文章编号 1006-9585 (2010) 02-0210-07 **中图分类号** P412 **文献标识码** A

A Study of Ultraviolet and Photosynthetically Active Radiation Pyranometer Calibration Method

HU Bo, WANG Yuesi, and LIU Guangren

State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract There has been a great interest in ultraviolet radiation (UV) due to the increasing of UV reaching the Earth's surface as a consequence of the thinning of the stratospheric ozone, and the influence of UV on ecosystem, climate change and environment. In order to obtain spatial distribution characteristics of UV, a ground-based UV measurement network must be established in the national wide. Routine calibration is the primary work to ensure the accuracy and comparability of measurement data. Standard radiative lamp and spectroradiometer (USB2000-UV-VIS) are used to establish broadband UV radiometer and quantum sensor calibration system. The accuracy of the calibrated broadband UV radiometer is within 5%, which meets the World Meteorological Organization (WMO) criterion of UV radiation study. The accuracy of the calibrated quantum sensor is within 5%. This accuracy is up to the WMO criterion of photosynthetically active radiation study. This reliable, accurate and inexpensive calibrate system can be applied to radiation measurement network in China.

Key words ultraviolet radiation radiometer, photosynthetically active radiation sensor, calibration

收稿日期 2008-12-15 收到, 2009-03-00 收到修定稿

资助项目 中国科学院重要方向项目 KZCX2-YW-433-04

作者简介 胡波, 男, 1974 年出生, 副研究员, 主要从事大气辐射学研究。E-mail: hb@dq.cern.ac.cn

通讯作者 王跃思, E-mail: wys@dq.cern.ac.cn

1 引言

平流层臭氧层变薄的事实以及大气臭氧具有的生态学和气候学效应,使得人们对太阳紫外辐射的观测及研究愈加重视。紫外和光合有效辐射是太阳辐射重要组成部分,无论对区域或全球能量、水分平衡、物种演替,还是对气候与环境包括人体健康在内的地球生态系统都具有重要意义 (McKenzie et al., 1991; Grants and Heisler, 1997; Hu et al., 2007a, 2007b)。紫外辐射还是二次气溶胶粒子、臭氧和过氧乙酰硝酸酯 (PAN) 等光化学污染形成的关键因子之一,近地面紫外强度衰减梯度观测对辐射传输与大气环境垂直变化的研究具有重要意义。

国内外学者对紫外和光合有效辐射已经开展了大量地基观测研究 (白建辉等, 2002; 胡波等, 2005; 毕家顺, 2006), 在 20 世纪 80 年代后期到 90 年代初期,加拿大、希腊、立陶宛、西班牙、比利时、匈牙利、卢森堡公国、波兰、捷克斯洛伐克共和国、冰岛、荷兰、瑞典、丹麦、爱尔兰、挪威、瑞士、德国、拉脱维亚、斯洛伐克、英国等国家逐步开展了相关的紫外辐射的观测及预测研究,对紫外辐射的危害进行积极的防护 (<http://www.srrb.noaa.gov>)。印度、马来西亚、日本及中国台湾等也先后建立了地基紫外辐射的观测研究站。中国科学院于 1988 年开始在中国 7 种典型生态系统类型 (农田、森林、草地、荒漠、湖泊、海湾、湿地) 中选取了野外生态站点并组建成中国生态系统研究网络。在网络中开展了紫外/光合有效辐射观测 (采用差减法进行观测), 于 2004 年利用宽波段紫外辐射、光合有效辐射传感器直接进行紫外/光合有效辐射观测 (Hu et al., 2007a, 2007b)。同期国内学者在不同地区也开展了大量的观测研究,加深了人们对紫外辐射的认知。

紫外辐射表最早于 1959 年由 Drummond 和 Marchgraber 发明 (Eppley TVUR 型),随着技术发展,紫外辐射测量科学家不断提高其观测精度,但是迄今尚未形成紫外辐射测量标准。定期对辐射传感器进行标定,是保证辐射观测仪器的精度和标定标准的可溯源性的基础。进行传感器

标定是保证观测结果的一致性必不可少的基础。辐射的测量与其他物理量一样,需要建立基准仪器。辐射测量仪器的校准由世界、区域和国家的辐射中心负责。在瑞士 Davos 由 7 台绝对腔体辐射表构成世界辐射测量基准 WRR (王炳忠, 1993a),其准确度优于 0.3%、一致性优于 0.1%。区域辐射中心每五年在达沃斯进行一次国际比对,然后将 WRR 传递到各国辐射中心,最后用国家标准进行辐射仪器标定 (王炳忠, 1993a)。

随着人们对到达地面的太阳紫外辐照度重要性认识的不断加深,紫外辐照度的测量以及测量仪器的标定也越来越受到关注。目前为止,太阳紫外辐照度测量仪及其标定的规范尚未建立起来。目前世界各国采用的太阳紫外辐射表,无论从响应波段范围,还是灵敏度等技术参数方面还有着较大差异,其标定方法也各不相同。这为这些资料之间的比对和有效应用带来了问题。

随着生态学、大气辐射学研究的深入,人们对光合有效辐射的关注和需求也日益增加。光合有效辐射观测现多采用光量子感应器,由于光合有效感应器的输出为电流,在采集时增加一个额定电阻 (高精密度电阻 604 Ω) 将电流输出转换为电压输出,从而便于数据的采集和后续处理。光合有效辐射传感器与紫外辐射传感器一样存在标定问题。

对紫外/光合有效辐射传感器的标定方法进行探讨是非常必要的,紫外/光合有效辐射校准可以用光谱仪对太阳光谱进行扫描,得到太阳光谱详细信息,进而可以确定紫外/光合有效辐射的标准值并对光合有效辐射表进行校准;但实际要准确测量太阳紫外/光合有效辐射光谱成本很昂贵,且其运行以及维护费用同样昂贵。因此,利用光谱仪建立一套紫外/光合有效辐射校准系统十分必要。

2 方法

目前我国尚无可用于太阳紫外辐照度测量的标准。即使从国外进口的仪器到使用规定期限后,仍需返回原产国重新校准,未经校准的紫外辐射仪器不能使用。中国计量科学研究院是我国光谱辐照度基准的保有、量值传递、国际比对和进行

计量的单位。在辐照度标准方面,我国所达到的水准一直处于国际先进行列。对于有一定光谱宽度的仪器而言,当用某种灯作光源所校准的仪器,就只能测量该种灯所提供的光源环境,因此不能以标准灯作光源校准仪器去测量自然环境下的太阳紫外辐射。紫外辐射仪器曝晒在标准灯光灯下,紫外辐射仪器得到的紫外辐射量应该与标准的紫外辐射能量相等,即

$$U_D = \sum (K_{ID} \cdot \tau_\lambda \cdot R_\lambda \cdot E_{\lambda 0}) = K \cdot K_{ID} \cdot \sum E_{\lambda 0}, K = \tau_\lambda \cdot R_\lambda, \quad (1)$$

其中, τ_λ 为滤光片的光谱透射比; R_λ 为光谱仪的光谱响应因子; $E_{\lambda 0}$ 为标准灯的光谱辐照度, U_D 是紫外辐射仪器在标准灯照射下的输出电压, K_{ID} 是紫外辐射仪器在标准灯下得到的灵敏度, K 为常数。

如果光源转变为太阳,相应则有:

$$U_S = \sum (K_{IS} \cdot \tau_\lambda \cdot R_\lambda \cdot E_S) = K \cdot K_{IS} \cdot \sum E_S, \quad (2)$$

其中, K_{IS} 是紫外辐射仪器在太阳曝晒条件下的灵敏度, E_S 为太阳的光谱辐照度。

由于 $E_{\lambda 0}$ 和 E_S 不同导致仪器灵敏度在日射与标准灯曝晒下是不一致,因此,校准光源与被测光源不可替代。太阳辐射光谱不稳定,难以作为校准仪器光源来使用,因此需要采用分光光度计法来进行仪器灵敏度校准。所谓分光光度计法就是先将标准灯入射的紫外辐射分成若干个极窄的波段 [世界气象组织 (WMO) 建议的指标为 1 nm 或更窄] (王炳忠, 1993b), 分别对每个小波段进行校准, 求出每个小波段灵敏度; 之后再再用其测量太阳辐射。由于每个测量波段极窄, 滤光片每个波段的透射比和感应器在该波段的灵敏度均可视为处于理想状态, 即在每个波段内不再具有光谱选择性 (王炳忠和吕文华, 1994)。

只要在标准灯下对仪器进行了校准, 得到光谱仪在各个波段上的响应因子, 然后将其用于太阳紫外辐射的观测。由于一般的分光光度计应用波长范围广泛, 因此比较笨重, 只适合在实验室使用, 很难将其先在实验室内用标准灯校准后, 再移到室外测量太阳辐射。因此需要采用一台较为小巧、便于移动的专用设备来进行紫外辐射仪器的标定工作。用光谱仪观测的紫外辐照度与紫外辐射表

的输出电压, 即可获得紫外辐射表灵敏度。

太阳紫外辐射光谱在实际大气中不断变化, 从而给标定带来误差, 但在稳定晴天时由于太阳光谱相对比较稳定, 可忽略紫外辐射光谱变化给标定带来的误差, 因此标定紫外辐射表时需要选择在稳定的晴天, 且大气质量数较小时进行标定, 尽量减少由于太阳紫外光谱变化带来的标定误差。

2.1 紫外辐射表的校准仪器

美国海洋公司便携式 UV-VIS 光谱辐射仪光谱范围为 200~1100 nm, 信噪比为 300:1, 模数转换器 (A/D 转换) 为 16 位, 杂散光在 435 nm 小于 0.1%、在 600 nm 小于 0.05%。紫外光栅分辨率为每纳米 600 线。光谱仪在紫外波段的闪耀波长为 300 nm, 可以较好地进行紫外辐射表标定。光谱仪每年返回厂家进行光谱校准以减小光谱仪的仪器误差。

光谱信号的温度响应大于 $0.1\% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, 没有恒温控制由外界温度变化而引起的测量误差将超过 4%, 因此必须增加恒温控制器, 保证光谱仪在一个恒定温度条件下观测, 减小温度变化带来的测量误差。使用时将光谱仪置于温度为 $25\text{ } ^\circ\text{C}$ 恒温暗室中, 以减少仪器狭缝带来的观测误差。通过增加恒温、积分球、暗室等装置降低杂散光, 仪器信噪比稳定在 300:1。

2.2 紫外表标定方法

在光学实验室用辐射标准灯对光谱仪进行光谱仪响应因子校准, 由于标准灯的能量是一个已知量, $E_{\lambda 0}$ 则由光谱仪直接测量得到, 因此可以利用公式 (1) 直接计算得到光谱仪的在波长 λ 处的光谱响应因子 R_λ 。在较小的波长范围内 R_λ 在标准灯与太阳实际光谱条件下是不变的。

紫外辐射外场校准中, 利用光谱仪对太阳光谱进行扫描, 太阳紫外辐射量与光谱仪的扫描光谱的对应关系为:

$$R_U = \int R_\lambda \cdot E_\lambda d\lambda, \quad (3)$$

其中, R_U 是紫外辐射照度, E_λ 是光谱仪扫描得到波长为 λ 波段的光谱辐照度。

2.3 校准的标准工作曲线的建立

辐射标准灯 (编号为 82012) 是全光谱标准灯, 其具体参数为: 距光谱仪的中心距离为 650 mm, 工作电压为 110 V, 输出电流为 8.5 A, 工

作范围为 250 ~ 2500 nm, 光谱亮度不确定度为 1.1% ~ 3.8%, 光谱照度不确定度为 1.25% ~ 3.9%。辐射标准灯每年在国家计量局进行标定和标准传递。

由于辐射标准灯给出的光谱能量较宽泛, 与光谱仪扫描得到的光谱波长并不一一对应, 因此先利用标准灯给定的数值 (如表 1 所示) 建立波长与能量对应的拟合计算公式, 然后利用该公式计算所需要波段对应的能量值。

表 1 标准灯能量参数

Table 1 The energy parameters of standard lamp

波长 / nm	辐照度 / $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$
250	0.01075
260	0.01886
270	0.03168
280	0.04995
290	0.07562
300	0.1106
310	0.1571
320	0.2160
330	0.2920
340	0.3875
350	0.4931
360	0.6228
370	0.7739
380	0.9422
390	1.136
400	1.360

辐射标准能量的拟合公式为:

$$Y = 0.04682 \cdot \exp(0.00894 \cdot X),$$

Y 是波长为 X 时对应的标准灯的辐照度, 相关系数 $R^2 = 0.97$ 。

利用辐射标准灯与光谱仪在实验室建立紫外辐射表校准的标准工作曲线的流程为:

(1) 先用光谱仪在辐射校准实验室采集暗电流的光谱响应曲线, 得到杂散光或噪声所形成的光谱仪响应曲线。

(2) 在相同环境下采集辐射标准灯光谱。

(3) 利用辐射标准灯的光谱减暗电流的光谱, 得到标准灯的光谱辐照度 $E_{\lambda 0}$ 。

(4) 利用辐射标准灯能量谱与在标准灯下实测的光谱仪的标准工作光谱, 通过公式计算得到

光谱响应因子 R_{λ} 。

(5) 利用光谱仪采集在太阳背景条件下的暗电流光谱 (即杂散光产生的响应光谱)。

(6) 用光谱仪对太阳紫外波段辐射进行扫描, 得到太阳紫外辐射的光谱。

(7) 利用太阳紫外辐射波段的光谱减暗电流的光谱, 得到太阳紫外辐射的光谱辐照度。

(8) 将整个紫外波段上的光谱积分就可得到紫外辐射量。

(9) 在实际观测中, 由于太阳的紫外辐射比实验室标准灯的能量强很多, 二者对观测所要求的积分时间有较大的差异: 在实验室条件下需要 3000 ms 的积分时间, 而在阳光下则只需要 900 ms。如果在太阳下还用 3000 ms 的积分时间进行观测, 在 >340 nm 波段处就出现饱和现象, 以致无法进行准确的测量。为了解决该问题, 在紫外光源下用不同的积分时间进行光谱的观测, 同时进行紫外辐射量的观测, 计算归一化的换算因子

$$C_r = (E_1 / E_2) \cdot (L_2 / L_1),$$

其中, E_1 、 E_2 分别是光谱仪在 900 ms、3000 ms 的光谱积分值, L_1 、 L_2 是紫外光源在积分时间为 900 ms、3000 ms 的紫外辐照度。实际测量时 $C_r = 3.611$ 。

(10) 利用观测的数据按照积分时间为 3000 ms 的响应系数进行计算, 在乘以 C_r 之后, 即可得到太阳的紫外辐照度。

在校准过程中, 将用光谱仪计算的太阳紫外辐射值作为真值。同时将待校准的紫外辐射用美国 Keithley 公司 2700 型数字万用表和多路转换器组合的一个工作系统 (其 A/D 转换精度为 18 位, 能够精确测定 $1 \mu\text{V}$) 采集紫外表的输出电压值, 紫外辐射表的输出电压值与光谱仪观测得到的紫外辐射量存在如下关系:

$$U(\theta_0) / K_f(\theta_0) = R_U(\theta_0), \quad (4)$$

其中, $K_f(\theta_0)$ 是紫外辐射表在太阳高度角为 θ_0 时的灵敏度系数 (即校准系数), $U(\theta_0)$ 是紫外辐射表在天顶角为 θ_0 时仪器的电压输出值, $R_U(\theta_0)$ 是天顶角为 θ_0 时光谱仪扫描光谱积分得到能量。

由于紫外辐射表灵敏度对太阳高度角的响应变化幅度很小, 在校准过程中不考虑由于太阳高度角变化而引起的紫外辐射表灵敏度系数的变异。将观测得到的 n 组紫外辐射表的灵敏度数据通过

三倍方差处理后,把符合条件的光谱仪计算结果与紫外辐射的输出电压进行线性拟合,拟合得到的斜率就是紫外辐射表的灵敏度系数 K_f 。

光合有效辐射与紫外辐射的标定原理及方法相似,光谱仪进行标定时得到的光合有效辐射量是能量值(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$),但光合有效辐射表观测得到的是光量子通量(单位: $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。因此,需要再进行光合有效辐射的单位换算。在整个光合有效辐射波段范围,由于响应光谱的差异不能直接进行单位换算。但是在极窄的波段可以认为传感器对光的响应为线性,因此可以进行单位转换。

λ 波段上的光合有效辐射的光量子 Q_λ 与 λ 波段上的光合有效辐射的能量单位的换算公式如下:

$$Q_\lambda = 119.8 \cdot h \cdot W_\lambda / (\lambda \cdot W_\lambda),$$

其中, Q_λ 是 λ 波段上的光合有效辐射的光量子(单位: $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), W_λ 是 λ 波段上的光合有效辐射的能量值, h 是 Planck 常数。

在实际应用中选中心波长 550 nm 光合有效辐射代替整个光合有效辐射 (Dye, 2004), 两种单位的换算因子如下:

$$1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \approx 4.57 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}.$$

3 结果与讨论

3.1 紫外辐射表标定方法的检验

为了检验利用光谱仪和辐射标准灯建立的紫外表标定方法的精度和可靠性,在实验室直接用光谱仪对辐射标准灯的光谱进行扫描积分得到该条件下辐射标准灯的紫外辐射量;在同等状态下将新购置的紫外辐射表 (CUV3, 290 ~ 400 nm, Kipp&zonne 紫外辐射表的实际光谱范围为 315 ~ 378 nm) 曝晒在辐射能量灯下,直接使用高精度万用表(精度为 $1 \mu\text{V}$) 采集紫外辐射表对辐射标准灯的响应电压,计算得出辐射标准灯的紫外辐射量。实验得到的光谱仪计算值为 $3.14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 而紫外辐射表观测得到的紫外辐射值为 $3.62 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从结果可以看出,光谱仪的结果要比紫外辐射表的观测结果小了 20% 左右。造成该现象的原因可能是由于光谱仪扫描是辐射标准灯的一部分杂散光(紫外光谱范围外的其他光谱),而紫外辐射表的滤效果要比光谱仪好。光谱仪工作时在其输入

端增加积分球,并将光谱仪安装在具有恒温装置的暗室,提高仪器的信噪比,尽量减少杂散光对观测结果的影响,保证观测精度。在实验中使用的积分球是 AvaSphere - 50 型,积分球的光谱范围为 200 ~ 2500 nm,积分球内径为 50 mm,采样口直径是 10 mm。

从图 1 中可以看出,杂散光对紫外辐射的测量精度存在着影响,增加滤光片将能进一步提高紫外辐射的观测精度。

在晴空条件(晴空指数 $K_s = G/G_0 \geq 0.6$, 其中 G 是观测的地面总辐射, G_0 是大气层顶的太阳总辐射),利用所建立的紫外辐射表的测定方法对紫外辐射表进行标定。

从图 2 可以看出,通过光谱仪扫描光谱积分得到的紫外量与直接用紫外辐射表观测得到的结果的变化趋势一致,这说明利用光谱仪进行紫外辐射表标定是可行的。光谱仪观测的紫外辐射比直接用 CUV3 紫外辐射表观测得到的结果小 4% 左右,这可能是由于光谱仪观测时的杂散光对紫外辐射的观测有一定的影响以及在积分过程中将辐射标准灯能量插值到观测波段上的插值过程中可能引入部分误差,但该误差在 WMO 关于紫外辐射观测误差要求范围内。

采用光谱仪标定的紫外辐射表的灵敏度与刚出厂的 CUV3 紫外辐射(如图 3)实际的灵敏度的相对差异在 4.1% 以下,再次说明了本文建立的标定方法能够满足 WMO 关于紫外辐射观测精

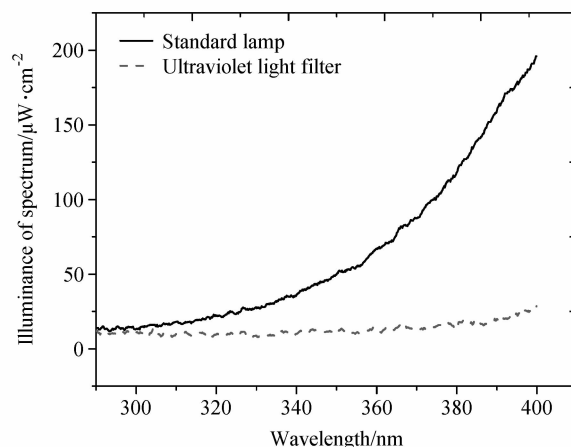


图 1 杂散光对紫外观测的影响

Fig. 1 The influence of diffuse spectrum on ultraviolet radiation measurement results

度的要求。

直接用光谱仪观测的紫外辐射量 (R_U) 与待标定的紫外辐射同时观测的电压值 (U), 按照线性拟合方程 (由于电压为零时, 与之相对应的紫外辐射值也应该是零, 因此在拟合时选用通过坐标原点的线性拟合方程进行拟合) 拟合待标定的紫外辐射表的灵敏度。

比较线性方程 $R_U = 4868.4 U$ 拟合得到的灵敏度值与直接计算的灵敏度值的平均值, 两者差异很小, 而且线性拟合计算得到的紫外辐射表的灵敏度与紫外辐射表 (刚出厂的紫外辐射表 CUV3) 的灵敏度的相对差异为 3.21%, 符合 WMO 的标

准要求。因此可以通过光谱仪传递能量标准的方案对紫外辐射表进行灵敏度的标定, 而且其标定的精度符合世界辐射组织对地基紫外辐射观测的精度要求。

3.2 光合有效辐射表标定方法的检验

从图 4 可以看出, 光谱仪观测的光合有效辐射与直接使用光量子传感器观测结果的变化趋势一致, 这表明通过光谱仪传递辐射能量标准的方案可以用于光合有效辐射表的标定。光谱仪得到结果比光量子传感器观测结果小, 这说明光谱仪对辐射标准灯的响应与太阳光谱的响应可能存在偏差, 但是两者相对偏差仅为 3.65%。采用光谱

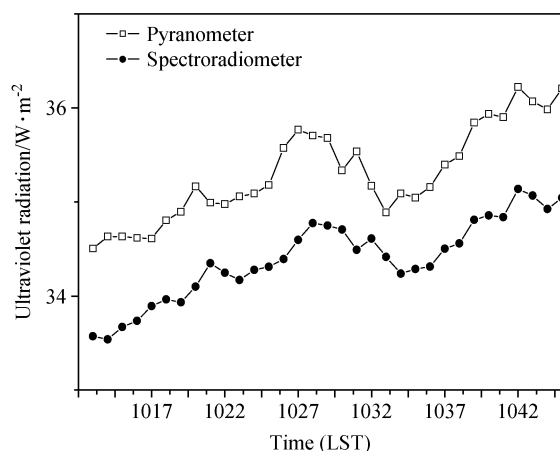


图 2 光谱仪得到的紫外辐射与紫外辐射表观测值对比
Fig. 2 Comparison of ultraviolet radiation measured by spectroradiometer and pyranometer

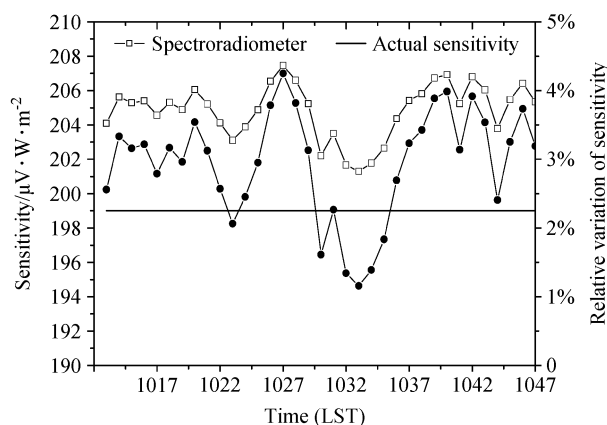


图 3 光谱仪标定的紫外辐射表的灵敏度与实际灵敏度的对比
Fig. 3 Comparison of sensitivity derived from spectroradiometer and actual values

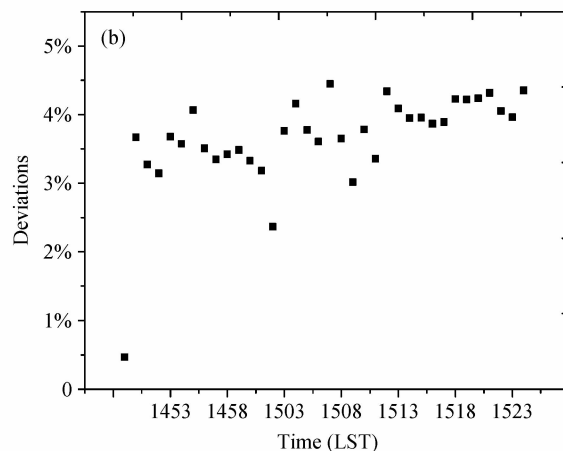
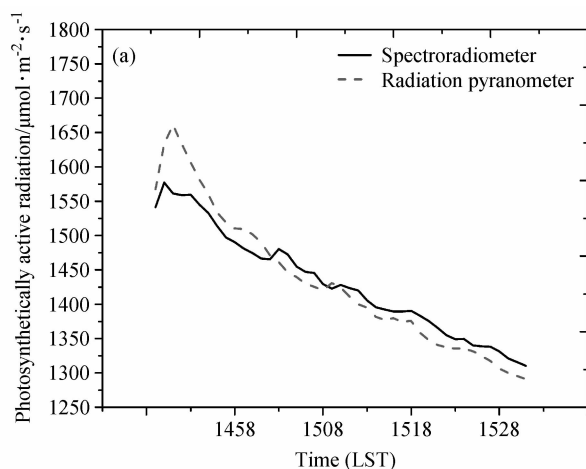


图 4 光谱仪观测与光合有效辐射表观测对比: (a) 观测值; (b) 相对偏差

Fig. 4 Comparison of photosynthetically active radiation measured by spectroradiometer and photosynthetically active radiation pyranometer: (a) Measured values; (b) relative deviations

仪对光合有效辐射

表灵敏度标定的方法可行,且精度能够满足地基辐射观测要求。因此可以采用光谱仪传递辐射标准灯的方案来进行光合有效辐射表的标定,且标定精度在 5% 以内。

4 结论

利用光谱仪和辐射标准灯传递能量的标定方法建立了紫外/光合有效辐射表标定系统,标定后的紫外/光合有效辐射表不确定度为 5%,达到了 WMO 对紫外/光合有效辐射观测仪器精度要求。利用光谱仪建立的紫外/光合有效辐射表标定方法简单易行且精度较高,能够很好地进行中国辐射观测网中紫外/光合有效辐射表的标定工作。该标定系统的成本和运行费用低廉,适用于中国生态系统研究网络总辐射表的标定工作。

采用 UV-VIS 光谱辐射仪进行标定方法的探索,虽其在稳定性及光谱纯度方面精度较低,但该光谱仪便于携带且价格低廉,能够很好地应用于野外工作中。在该方法较为完善时,我们将采用稳定性及光谱纯度都较高的光谱仪进行传感器的标定工作,进一步提高标定的精度。

致谢 感谢中国气象局王炳忠老师在本方法建立中给予的帮助和指导。

参考文献 (References)

- 白建辉,王庚辰,胡非. 2002. 太阳紫外辐射在大气中衰减的探讨 [J]. 气候与环境研究, 7 (4): 440 - 446. Bai Jianhui, Wang Gengchen, Hu Fei. 2002. Studies on attenuation of solar ultraviolet radiation in atmosphere [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7 (4): 440 - 446.
- 毕家顺. 2006. 低纬高原城市紫外辐射变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (4): 637 - 641. Bi Jiashun. 2006. A study of variation characteristics of the ultraviolet radiation of city at the low latitudes and plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (4): 637 - 641.
- Dye D G. 2004. Spectral composition and quanta-to-energy ratio of diffuse photosynthetically active radiation under diverse cloud conditions [J]. J. Geophys. Res., 109: D10203, doi: 10.1029/2003JD004251.
- Grants R H, Heisler G M. 1997. Obscured overcast sky radiance distributions for ultraviolet and photosynthetically active radiation [J]. J. Appl. Meteor., 36: 1336 - 1345.
- 胡波,王跃思,何新星,等. 2005. 北京 2004 年一次强沙尘暴过程的辐射特征研究 [J]. 气候与环境研究, 10 (2): 265 - 274. Hu Bo, Wang Yuesi, He Xinxing, et al. 2005. Variation properties of earth's surface solar radiation during a strong dust storm in Beijing 2004 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (2): 265 - 274.
- Hu B, Wang Y S, Liu G R. 2007a. Ultraviolet radiation spatio-temporal characteristics derived from the ground-based measurements taken in China [J]. Atmos. Environ., 41 (27): 5707 - 5718.
- Hu B, Wang Y S, Liu G R. 2007b. The spatio-temporal characteristics of Photosynthetically active radiation in China [J]. J. Geophys. Res., 112: doi: 10.1029/2006JD007965.
- McKenzie R L, Matthews W A, Johnston P V. 1991. The relationship between erythral UV and ozone, derived from spectral irradiance measurements [J]. Geophys. Res. Lett., 18: 2262 - 2272.
- 王炳忠. 1993a. 太阳辐射能的测量与标准 [M]. 北京: 科学出版社, 334. Wang Bingzhong. 1993a. The Methods and Standard of Atmospheric Radiation Observation [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 334.
- 王炳忠. 1993b. 分光总日射表校准因子的迭代计算法 [J]. 太阳能学报, 14 (4): 311 - 316. Wang Bingzhong. 1993. An interaction method for determining the calibration factor of spectral pyranometer [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica (in Chinese), 14 (4): 311 - 316.
- 王炳忠,吕文华. 1994. 在论分光总日射表的校准 [J]. 太阳能学报, 15 (4): 391 - 394. Wang Bingzhong, Lü Wenhua. 1994. Further study on calibration on spectral pyranometer [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica (in Chinese), 15 (4): 391 - 394.