

郑向东,程海轩. 南极中山站太阳紫外辐射测值比较. 应用气象学报, 2020, 31(4): 482-493.

DOI: 10.11898/1001-7313.20200410

南极中山站太阳紫外辐射测值比较

郑向东^{1)*} 程海轩²⁾

¹⁾(中国气象科学研究院, 北京 100081)

²⁾(北京师范大学物理系, 北京 100875)

摘 要

比较分析了 2017 年南极中山站 3 种仪器测量地面太阳紫外 B(UVB)波段和紫外 A(UVA)波段的辐照度。以 Brewer 光谱仪测值为参考, 国产宽波段 FSUVB 日射表在 UVB(波段 280~315 nm)的辐照度相对误差为(55±75)%, 误差随大气臭氧总量的增加呈上升趋势, 但在南极“臭氧洞”期间偏低。Yankee UVB 宽波段日射表在 UVB(波段 280~320 nm)的辐照度相对误差为(-31±22)%; 国产宽波段 FSUVA 日射表在 UVA(波段 315~400 nm)的辐照度相对误差为(23±5.9)%。太阳天顶角低于 80°的晴天以 Tropospheric Ultraviolet Visible (TUV)辐射模式计算结果为参考时, FSUVB, Yankee UVB 和 FSUVA 辐照度的平均相对误差分别为(30±37)%、(-22±19)%和(27±6.4)%, 而 Brewer 相对误差未超过 3.5%。国产宽波段 UV 日射表测值偏高, 反映出波长较长的杂散光对太阳辐照度测值影响明显。

关键词: FSUVA/FSUVB 日射表; Brewer 光谱仪; TUV 模式计算; UV 辐照度; 南极中山站

引 言

太阳紫外(ultraviolet, UV)辐射可分为 3 个波段: 紫外 C(UVC), 即波长短于 280 nm; 紫外 B(UVB), 波长为 280~315 nm; 紫外 A(UVA), 波长为 315~400 nm。20 世纪 90 年代研制的仪器也将 280~320 nm 波段定义为 UVB。太阳辐射中全部的 UVC 和 90% 的 UVB 通过大气时几乎被臭氧层吸收, 但 UVA 受影响较少, 因此, 到达地表太阳 UVB 辐射比 UVA 辐射明显偏低, 且受臭氧层变化影响明显。大气臭氧层损耗在 20 世纪 80 年代因为南极“臭氧洞”的发现而得到极大关注。地表太阳 UV 辐射, 特别是 UVB 辐射因其重要的环境健康效应而得到重视。

因臭氧对太阳 UV 辐射吸收系数对波长变化强烈的依赖性, 地表太阳 UV 光谱辐照度在波段 290~400 nm 内有近 10⁶ 量级变化, 而 UVB 波段的变化也达到 10⁴~10⁵ 量级^[1], 因此, 地表太阳 UV

辐射观测对辐射表信号的动态响应范围及探测器的灵敏度均有很高要求, 传统以灵敏高、响应信号范围大的光电倍增管为传感器的光谱仪在 UV 辐射测量得到应用。以测量臭氧总量为主的 Brewer 臭氧光谱仪, 因兼顾太阳 UVB 光谱辐照度的测量也得到长期应用^[2]。南极“臭氧洞”发现后, 美国也在南极、北极布置了 SUV-100 型式光谱仪进行长期观测^[3]。我国在 20 世纪 90 年代研制了紫外光谱仪并开展相关研究^[4]; 对紫外辐射指数分级^[5]、极地辐射与臭氧关系^[6-7]以及高原地区的 UV 辐射及其相关的工作也开展较多^[8-14]。

由于光谱仪价格高, 运行维护成本昂贵, 因此对太阳 UV 辐射观测的宽波段日射表技术得到重视。早期国外广泛使用的宽波段 UV 日射表是 Robertson-Berger(R-B)表^[15], 它基于 UV 辐射的荧光效应原理进行测量。20 世纪 90 年代美国研制的 Yankee UVB 日射表是在 R-B 表的基础上采用硫酸镍(NiSO₄)晶体滤光片, 极大提高了测量灵敏度^[16]。我国在青海瓦里关全球大气本底站和西藏等地也曾

2019-12-19 收到, 2020-03-19 收到再改稿。

资助项目: 中国气象科学研究院科技发展基金(KJ2018004)

* 邮箱: xdzheng@cma.gov.cn

利用该日射表开展观测研究^[13,17]。此外也有采用其他原理的宽波段 UV 日射表,如荷兰 Kipp & Zonen、美国 Solar Light 和日本 EKO 等产品开展工作。为保证观测数据质量,宽波段日射表通常定期参加以光谱仪(如 Bentham 或 Brewer)测值或晴天条件下辐射模式计算结果为参考的国际比对测量和标定工作^[18-19]。通常宽波段 UV 日射表辐照度测值差异与以下因素有关:①仪器测量原理方法,②测量大气环境的差异包括太阳天顶角(solar zenith angle, SZA)、臭氧总量及臭氧、温度垂直廓线分布和地面反照率,③高太阳天顶角情况下日射表的余弦效应,④标定方法的差异或标定与观测环境差异等。宽波段 UV 日射表的辐照度测值与光谱仪差异一般在±10%以内很常见。

我国也研制出国产宽波段日射表,在气象部门布置用于观测^[20],并制定相关国家标准^[21]。有研究对我国不同厂家研制的宽波段 UV 日射表进行性能测试^[22-23],但在较薄臭氧层环境下开展工作的报道较少。从 1993 年开始,我国南极中山站就利用 Brewer 光谱仪开展臭氧总量和 UVB 光谱辐照度观测^[24]。2017 年 1—12 月在南极中山站利用江苏无线电研究所生产的 FS-UVA6(简称 FSUVA)和 FS-UVB6(简称 FSUVB)日射表^[25]、美国 Yankee UVB 日射表(#950102)(观测截至 2017 年 12 月)和荷兰 Brewer #193 光谱仪(简称 Brewer)观测太

阳 UV 波段辐照度,通过比较,了解宽波段 UV 日射表,特别是 FSUVA 和 FSUVB 的技术水平。此外,为更全面评估宽波段 UV 日射表测值的准确性,本文还利用 TUV 辐射传输模式^[26],计算晴天条件下 UVB 和 UVA 的辐照度,并与上述 3 种仪器测量结果比较。

本文选择在南极中山站进行比对观测的原因包括以下 3 点:①南极出现春季“臭氧洞”,为检验宽波段 UVB 日射表响应大气臭氧层急剧变化提供了独一无二的条件;②南极洁净的大气环境能够影响晴天到达地表太阳辐射要素,如大气气溶胶和地表反照率等因子在南极相对变化较小,使比对观测数据的变化机制解析相对简单;③南极较严酷的气象环境(低温、低水汽)对宽波段 UV 日射表的长期、连续运行也是很好的检验。比较结果能为 FSUVA 和 FSUVB 的应用和今后可能的技术改进及发展提供参考。

1 观测仪器及数据处理

1.1 仪器技术参数

表 1 为 4 台 UV 辐射仪器的技术参数。Yankee UVB 所用的 NiSO₄ 晶体滤光片也是早期 Brewer 光谱仪所用,但本文 MKIII 型 Brewer 光谱仪因采用双光栅组合分光,未使用该滤光片,从而避

表 1 UV 辐射仪器参数

Table 1 Specifications of instruments for UV irradiance measurements

技术参数	Yankee UVB	FSUVB	FSUVA	Brewer
波长范围/nm	280~320	280~315	315~400	286.5~363
余弦效应	<5% ^[16]	<4% ^[25]	<7% ^[25]	<5% ^[27]
工作原理	通过 NiSO ₄ 滤光片的辐射照在 MgWO ₄ 涂面的荧光效应产生易测绿光 ^[16]	截止滤光片过滤辐射照在探测器接收面上	同 FSUVB	光栅衍射分光
探测器	GaAsp 硅光二极管探测荧光效应后的绿光 ^[16]	硅光二极管探测	同 FSUVB	光电倍增管
仪器响应时间/s	1	1.5	1.5	<1
数据时间分辨率/min	1	1	1	9(光谱扫描)
标定方法	150 W Xeron arc 光源及光谱仪组合标定 ^[16]	溯源计量院光源标定荷兰 Kipp & Zonen 公司的 UVS-AB-T 宽波段日射表,UVS-AB-T 室外标定 FSUVB	同 FSUVB	二级溯源 NIST1000W 钨灯室内光谱测值标定,363~400 nm 采用 UVA 订正因子估算 ^[27]
稳定度/(%·a ⁻¹)	未知	<5	<5	<0.5*
背景最低信号	未知	<10 mv	<10 mv	5 光子数
辐照度测量范围/(W·m ⁻²)	<10	<6	<90	<90
日测值相对误差/%	2	<10	<10	<5
工作环境温度/℃	-40~40	-40~50	-40~50	-40~50

注:*表示来自 2011 年 1 月和 2017 年 11 月标定值比较。

免温度效应给 UV 光谱测量带来的影响。由于 Brewer 不能直接测定波段 363~400 nm 的光谱辐照度,这一波长范围的 UVA 光谱值参考芬兰气象局依据 Bentham 光谱仪在波段 363~400 nm 的光谱辐照度测值与 Brewer 光谱仪同步在波长 363 nm 光谱辐照度测值的比值而确定的 UVA 订正因子进行估算^[27]。4 台仪器在 UV 测量的标定方面差别明显,Yankee UVB 和 Brewer 均采用室内的标准光源进行标定,而 FSUVA 和 FSUVB 虽然溯源于中国计量科学研究所的标准光源,但其灵敏度系数则

是通过另一台宽波段 UV 日射表传递而测定的。

图 1 是 4 台仪器的光谱响应曲线。图 1 中 Brewer 是室内直接测定的结果,两次测试结果表明,光谱响应曲线变化幅度为-4%~-2%,平均每年变化为-0.6%~-0.3%,这种变化很可能源自光电倍增管的老化。而 Yankee UVB 和 FSUVA 及 FSUVB 的光谱响应曲线均是厂家给出的相对值,在对应的规定波长均有一定透过率,其中 FSUVB 集中在短于波长 315 nm 部分,而 FSUVA 则集中在长于波长 315 nm 部分。

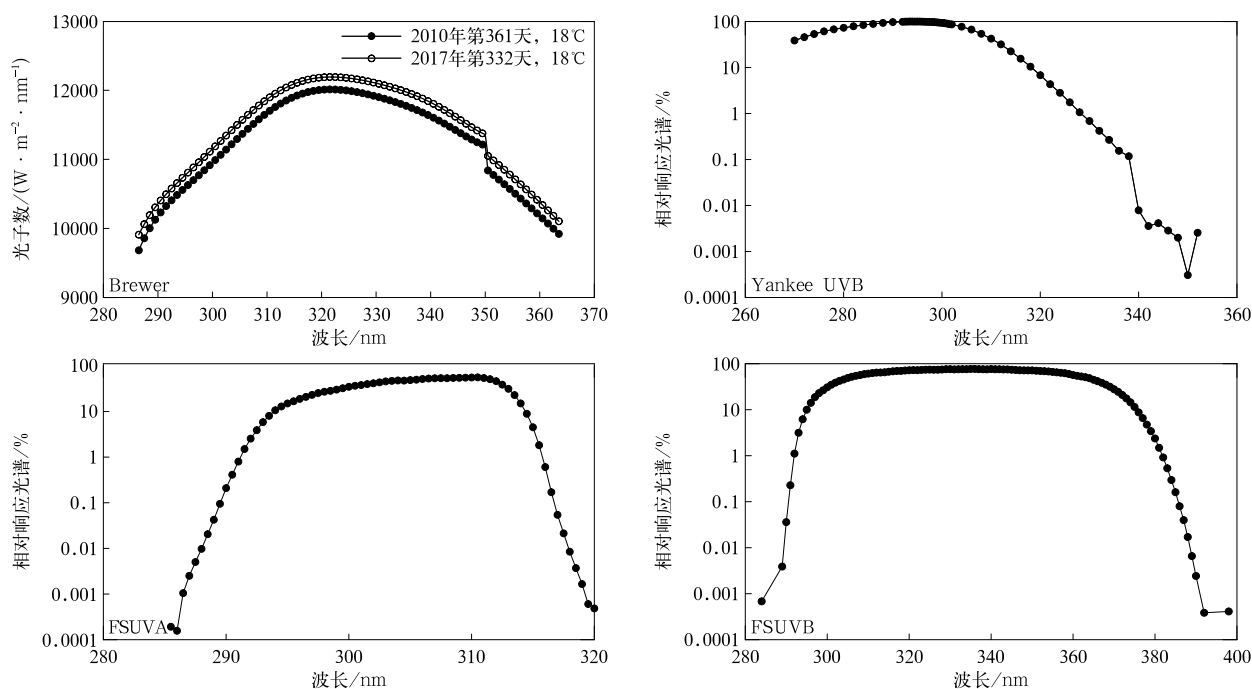


图 1 Brewer, Yankee UVB, FSUVA 和 FSUVB 响应光谱曲线

Fig. 1 Spectral response curves of Brewer spectrophotometer, Yankee UVB, FSUVB and FSUVA pyranometers

观测仪器均安装在中山站站区北侧,宽波段日射表的数据通过 CR3000 数据采集器(Campbell Scientific)获取,采样频率为 1 Hz,数据按分钟平均值存贮。宽波段日射表安装在固定的平台上,而 Brewer 在方位上跟踪太阳,因要兼顾臭氧总量观测或汞灯波长检测,Brewer 不是呈现连续测量 UV 辐照度的工作状态。所有辐射仪器均由同一台计算机控制。

1.2 观测数据处理

Brewer 完成 1 次 UV 光谱辐照度观测需 9 min。因此,本文在比较宽波段 UV 日射表和 Brewer 光谱仪测值时,以 Brewer UV 光谱观测的初始和结束时间为依据平均该时间段内宽波段日射表测值。本文

将 Brewer 在波段 286.5~315 nm, 286.5~320 nm 和 315~400 nm 的积分值分别与 FSUVB, Yankee UVB 和 FSUVA 观测值比较。

1.3 晴天 UV 辐照度的计算

为了独立于仪器观测数据,本文利用 Tropospheric Ultraviolet Visible (TUV) 辐射传输模式 (<http://cprm.acom.ucar.edu/Models/TUV/>) 计算晴天太阳天顶角低于 80° 的 UV 光谱辐照度,并分别积分波段 280~315 nm, 280~320 nm 以及 315~400 nm 辐照度用于评估比较宽波段日射表 UVB 和 UVA 的测值。TUV 是采用伪球面大气二流或四流近似算法求解辐射传输方程,用于对流层紫外或部分可见光波段辐射辐照度、光化辐射通量以及

分子光解速率等计算^[26]。TUV 模式采用太阳紫外光谱辐照度监测(Solar Ultraviolet Spectral Irradiance Monitor, SUSIM)大气上界太阳光谱,在计算中主要的输入参数包括臭氧总量、所在纬度地区的臭氧、温度垂直廓线分布的气候值、地表反照率、气溶胶的光学厚度、单次散射反照率以及浑浊度系数(α)。TUV 模式在我国得到广泛应用^[13]。本文采用与中山站相同纬度的日本昭和站(69.00°S, 39.35°E)所测气溶胶光学特性的气候参数值^[28]及

中山站 Brewer 观测臭氧总量和 MODIS 卫星的地面反照率数据作为模式的输入参数完成对 UV 上述 3 个波段的光谱辐照度的计算。

2 结果分析

2.1 UVB 测值比较

图2是2017年FSUVB和Brewer在波长315 nm以下的辐照度,以及Yankee UVB在波段280~320 nm

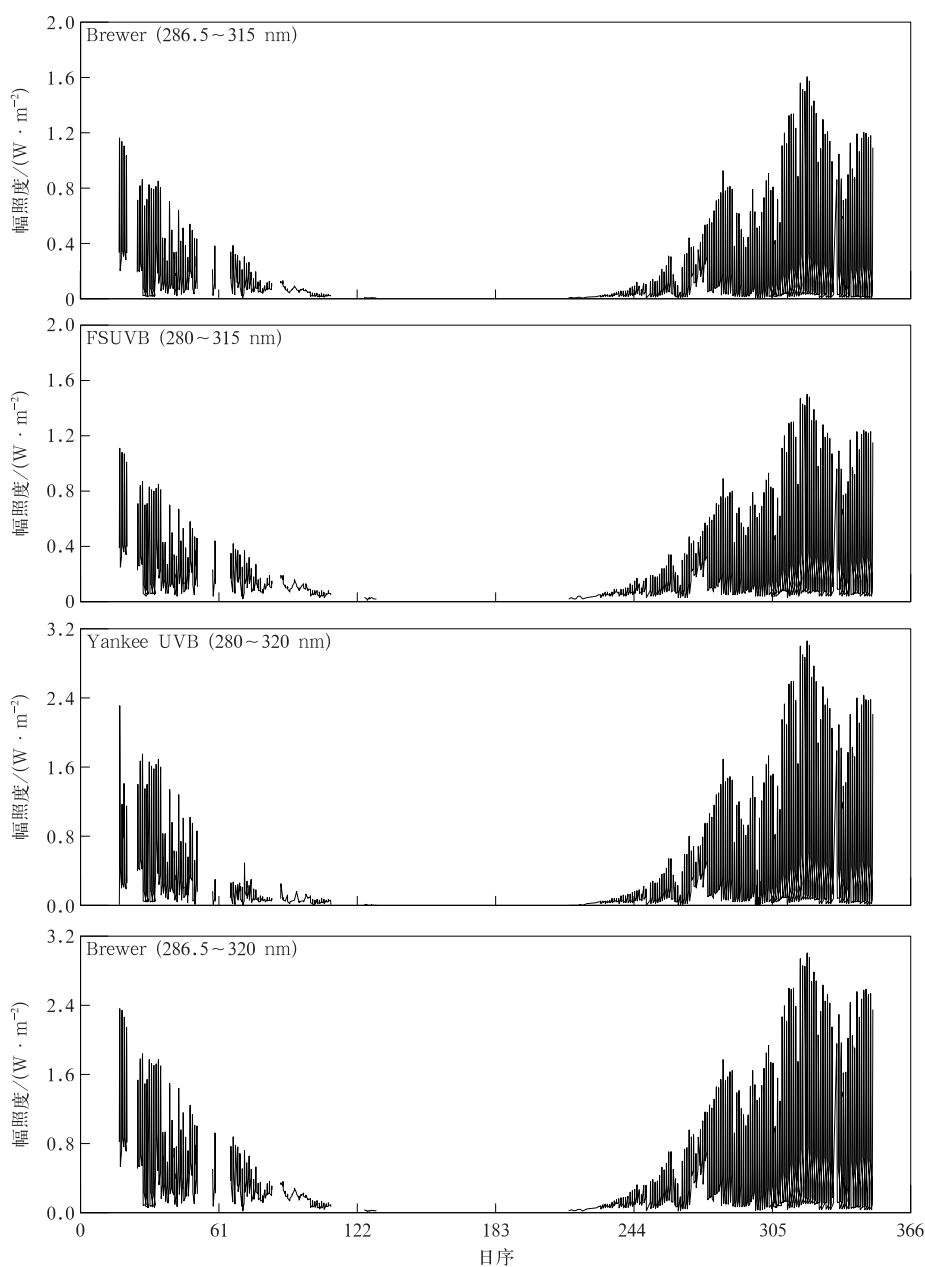


图2 2017年UVB辐照度测量序列

Fig. 2 Time series of UVB irradiance measured in 2017

和 Brewer 在波段 286.5~320 nm 的辐照度。由图 2 看到,3 种测量仪器得到的 UVB 辐照度随季节变化明显,包括“臭氧洞”期间(第 244 天以后)因臭氧层减少导致地表 UVB 辐照度异常增加,这说明所有仪器均能观测到地表 UVB 辐照度的合理变化。另外基于波长范围定义的 UVB 辐照度有明显差异,波长 320 nm 以下的辐照度明显高于波长 315 nm 以下的测值,这是因为臭氧层对太阳 UV 辐射的吸收对波长依赖性的结果。

图 3 是 FSUVB 和 Yankee UVB 相对于 Brewer 的误差(FSUVB 测值减去 Brewer 测值,下同)。由图 3 可以看到,FSUVB 测值普遍高于 Brewer,平均误差为 $0.04 \pm 0.0316 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (观测次数 $n=1715$),相对误差为 $(55.2 \pm 75.2)\%$ 。Yankee UVB 系统低于 Brewer 在波段 286.5~320 nm 的辐照度

测值,平均误差为 $-0.15 \pm 0.15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ($n=1715$),相对误差为 $(-31.8 \pm 22.2)\%$ 。有几个时段 Yankee UVB 误差整体上超过 $1.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,原因不明,可能与 Yankee UVB 安放在固定平台,而日射表存在方位效应有关(Brewer 始终跟踪太阳)。FSUVB 平均误差的绝对值低于 Yankee UVB,原因是截止到波长 315 nm 的 UVB 积分辐照度较低。两台仪器相对误差的标准偏差(75.2%和 22.2%)也表明 FSUVB 测值的精密度低于 Yankee UVB 测值。

图 3 还显示 FSUVB 测值低于 Brewer 时段主要在 2017 年的南极“臭氧洞”期间,实际上 2018 年 FSUVB 也显示出在“臭氧洞”期间偏低(图略)。为此,本文进一步调查 UVB 误差与臭氧总量之间的统计关系。图 4 显示 2017—2018 年 FSUVB 相对误

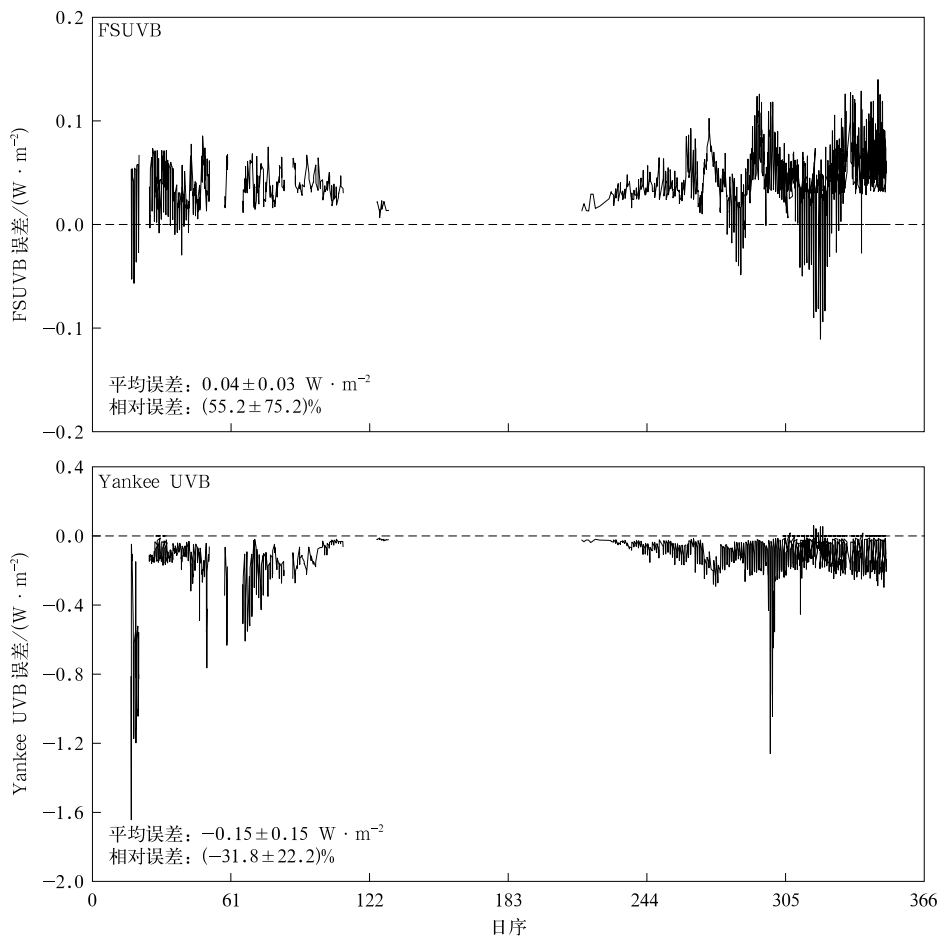


图 3 2017 年 FSUVB 及 Yankee UVB 辐照度相对于 Brewer 的测量误差

Fig. 3 Irradiance errors of FSUVB and Yankee UVB from Brewer measurements in 2017

差与臭氧总量关系,之所以对2018年的数据进行统计分析是因为中山站“臭氧洞”2018年的持续时间比2017年长。图4还显示了2017年Yankee UVB相对误差与臭氧总量之间的关系。由图4可以看到,无论是太阳天顶角在 $45^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 或固定在 65° 附

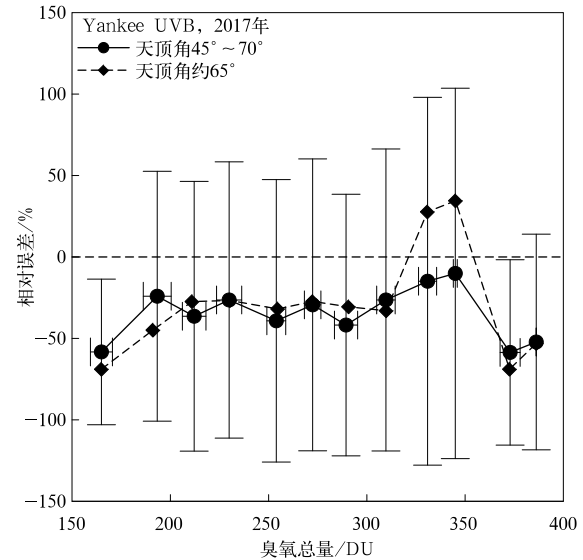
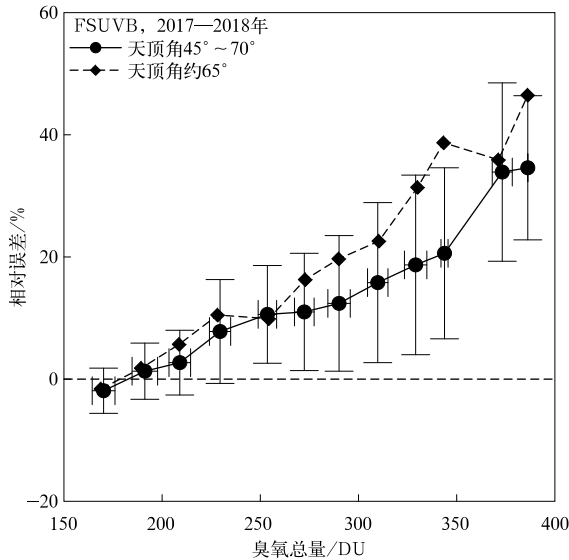


图4 FSUVB和Yankee UVB与Brewer辐照度相对误差与臭氧总量的关系
Fig. 4 Relative errors of UVB irradiance measured by pyranometers as a function of total ozone from Brewer measurements

管在春季“臭氧洞”期间FSUVB测值也明显增加(图1),但增加幅度没有Brewer大。也就是说,FSUVB对波段 $290\sim 315\text{ nm}$ 辐射变化远没有Brewer敏感。随着太阳天顶角季节性下降、地面太阳UVB辐照度也上升,但其上升幅度不如包含波长更长波段的辐射明显,这是因为“臭氧洞”随着太阳天顶角季节性下降而消退,导致大气对太阳UVB辐射吸收增强,但FSUVB辐照度测值高于Brewer。FSUVB辐照度测值增加来自两个方面的贡献:①太阳天顶角降低导致UVB辐照度上升,其对UVB辐照度增加幅度的贡献低于Brewer相应测值(因为Brewer比FSUVB对UVB波段辐射更敏感),②波长大于UVB波段、受臭氧层吸收较弱波段的辐照度上升的贡献,这部分可以解释FSUVB辐照度测值增加。因此,FSUVB所探测的辐照度中来自波长长于 315 nm 杂散光贡献明显。这是造成图4中FSUVB与Brewer测值的相对误差随着臭氧总量的上升而上升的原因。

近,FSUVB辐射度在“臭氧洞”期间均接近或者低于Brewer测值,并随着臭氧总量的增加明显上升,这说明FSUVB的误差随臭氧总量变化而变化,但Yankee UVB的误差随臭氧总量变化关系不明显。

FSUVB测值误差与臭氧总量的关系说明,尽

作为对比,Yankee UVB的相对误差与臭氧总量无明显关系,这与Yankee UVB因利用 NiSO_4 晶体滤光片有效过滤紫外以外的辐射,从而使其测值呈现与Brewer在波段 $286.5\sim 320\text{ nm}$ 的一致性有关。Yankee UVB测值系统低于Brewer。

2.2 UVA测值比较

与UVB相比,太阳UVA的光谱(波段 $315\sim 400\text{ nm}$)范围长、辐照度值大且受大气臭氧层影响小。图5是Brewer和FSUVA的UVA辐照度测值时间序列。图5可以看到,FSUVA和Brewer均能反映出UVA辐照度随季节变化的特征,且受“臭氧洞”影响不明显。但Brewer的UVA辐照度值明显低于FSUVA。FSUVA相对于Brewer的误差(图6a)和相对误差(图6b)随时间变化表明,误差随UVA季节变化明显,平均误差为 $4.3\pm 2.8\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ($n=1716$),但相对误差的时间序列没有显著的季节特征(平均值为 $(23.0\pm 5.9)\%$),在第61天以前和第305天以后出现振荡现象,造成这种现象的

原因不明。

FSUVA 测值明显高于 Brewer 的原因可能有

两方面：①FSUVA 受到波长长于 400 nm 以上的杂散光的影响，因为杂散光导致误差存在季节变化；

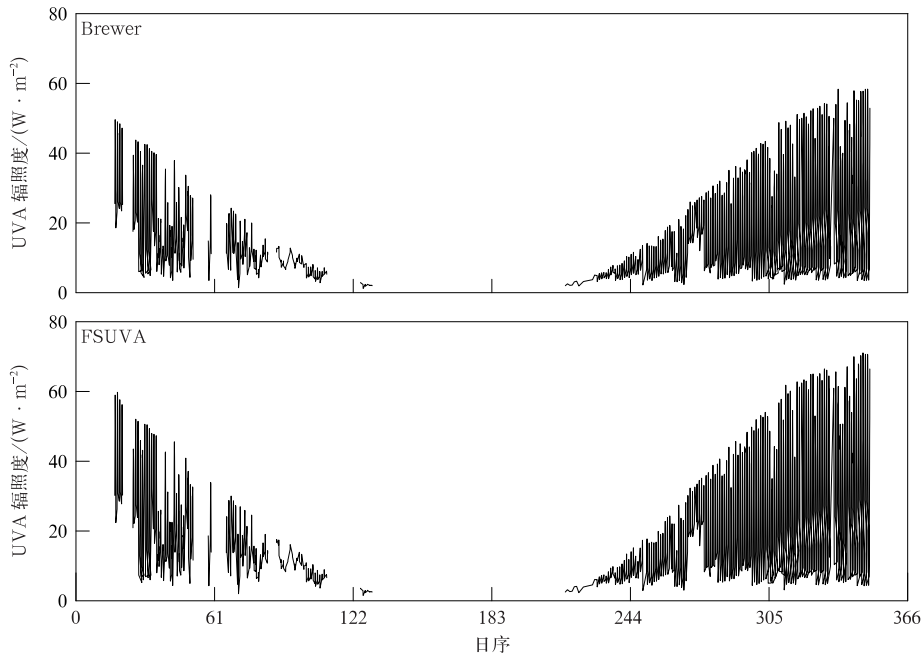


图 5 2017 年 Brewer 及 FSUVA 测量的 UVA 辐照度时间序列

Fig. 5 Time series of UVA irradiance measured by Brewer and FSUVA in 2007

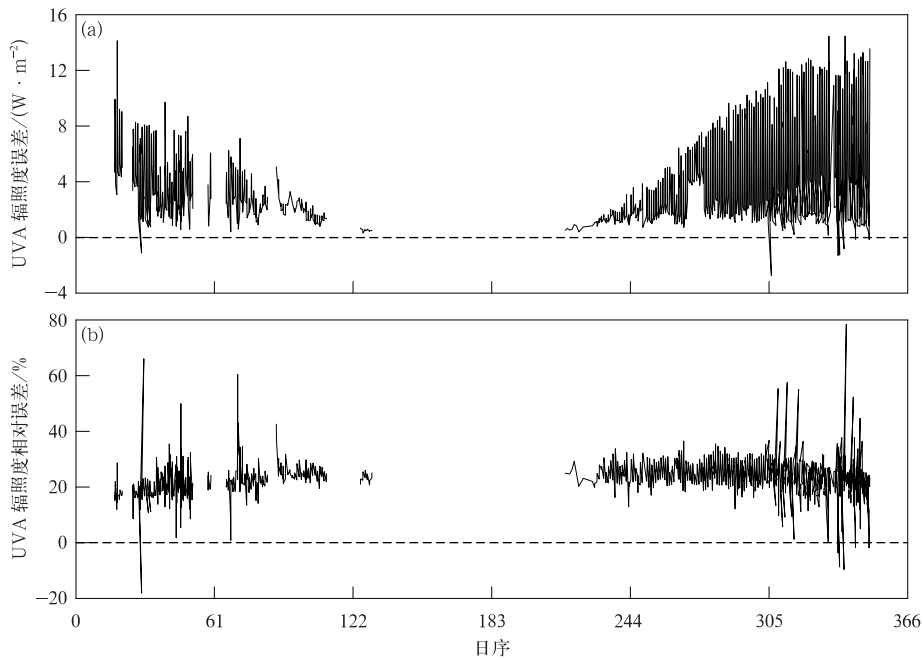


图 6 以 Brewer 测值为标准 FSUVA 测得 2017 年太阳 UVA 辐照度的误差(a)及相对误差(b)

Fig. 6 FSUVA solar UVA irradiance error(a) and the relative error(b) with the standard of Brewer measurements in 2017

②FSUVA 的标定所得灵敏度系数存在系统误差。

2.3 晴天测值与模式计算比较

模式计算是对观测结果进行评估的有效手段。晴天条件下 UV 辐射模式计算比较成熟。早期模式计算个例表明, Brewer 的 UVB 光谱测值与计算结果相当一致^[29]。TUV 是计算 UVA 和 UVB 光谱辐照度的常见模式之一^[30]。本文模式中所需的臭氧总量取自中山站 Brewer 观测的日平均数据, 地面反照率来自于对 MODIS MCD43C3 的数据的提取^[31], 气溶胶光学厚度 τ 和浑浊度系数 α 均采用日

本昭和站(与中山站纬度相同)的气候测值^[28]分别为 0.022 和 1.1, 气溶胶单次散射反照率 ω , 取自德国 Neumayer 站(70.65°S, 8.25°W)值, 为 0.975。根据地面天气的观测结果, 选择 2017 年太阳天顶角在 80°以下, 总共 197 次晴天观测值输入模式计算。计算结果与 UVB(含波段 280~315 nm 及 280~320 nm 两种情形)和 UVA 辐照度测值进行比较(图 7)。由图 7 可以看到, 2017 年整年晴天条件下 UVB 测值与 TUV 计算值比较一致, 而“臭氧洞”对 UVB 测值影响也比较明显(9 月 UVB 测值偏高),

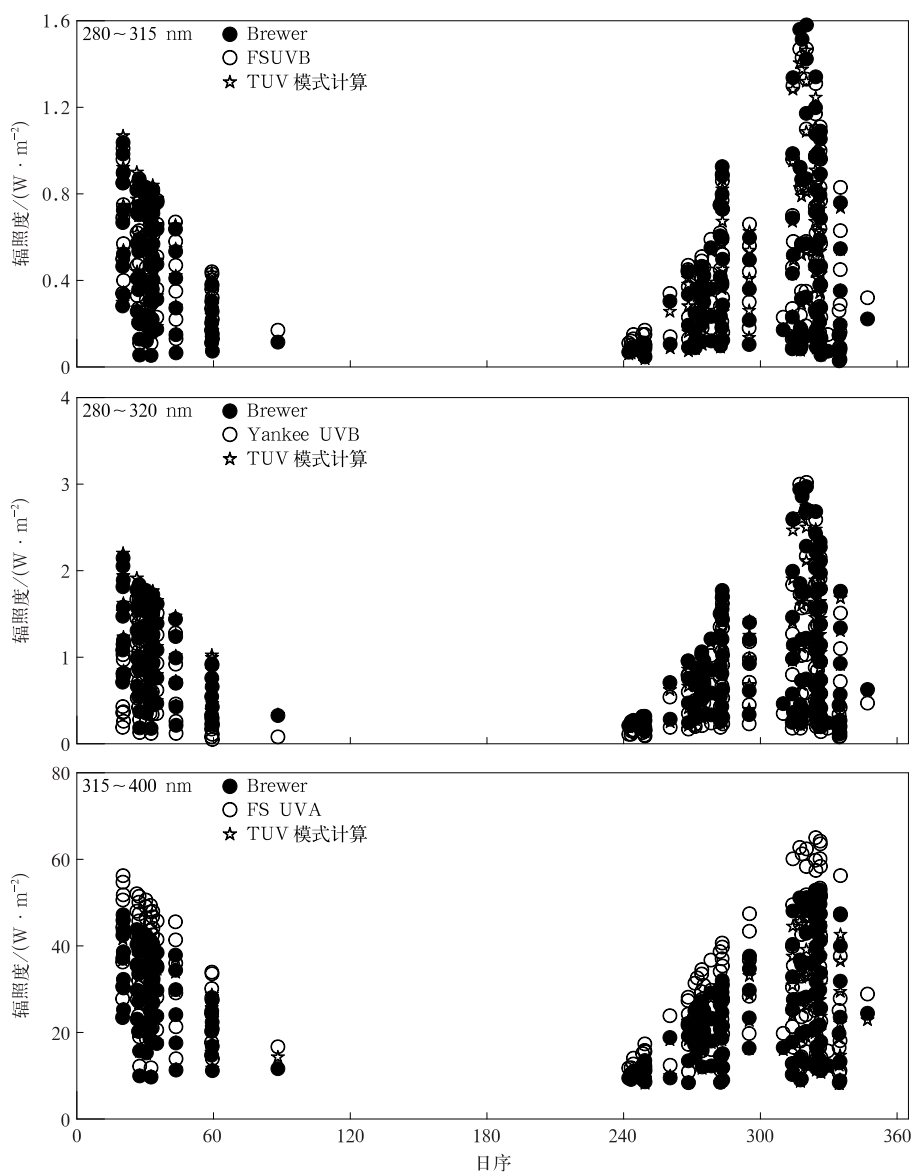


图 7 2017 年观测及 TUV 模式计算的晴天太阳天顶角小于 80° 南极中山站的太阳 UV 辐射在波段 280~315 nm, 280~320 nm 及 315~400 nm 的辐照度变化

Fig. 7 The variation of TUV simulation and measured solar UV irradiances values under cloud-free sky and the SZA less than 80° at 280—315 nm, 280—320 nm and 315—400 nm at Zhongshan Station, Antarctica in 2017

但 FSUVA 测值明显高于 TUV 计算结果,而根据 Brewer 观测而估算的 UVA 辐照度值则与 TUV 计算结果较接近。

表 2 是观测值与模式计算的比较。由表 2 可以看到,FSUVB,FSUVA 和 Yankee UVB 测值和模式计算结果均存在较大差别,而 Brewer 测值则与 TUV 模式计算结果较接近。在波段 280~315 nm,误差值和标准偏差均很小,但相对误差较大,FSUVB 误差均值达 30% 以上,Yankee UVB 相对误差值约为 -20%。FSUVA 误差在晴天平均接近 $7.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,相对误差高达 27%,而 Brewer 在 UVA 内与模式值仅差 3.4%,这也说明 Brewer 通过 UVA 订正系数得到的波段 315~400 nm 的 UVA 辐照度与模式计算结果很接近,订正系数合理。误差的标准偏差表明 Brewer 对 UV 测值的精密度随

着波长的增加而提高,而 FSUVB 测值的精密度相对值最低,为 37.3%,其次是 Yankee UVB,FSUVA 仅为 6.4%。

图 8 是晴天 Brewer,FSUVB 和 Yankee UVB 测值与 TUV 模式结果相对误差与臭氧总量变化的关系。与图 4 相比,图 8 中样本量明显降低(因为仅天气记录的晴天数据),臭氧总量的最高值低于 340 DU。由图 8 可以看到,随着臭氧总量的增加,Brewer 和 Yankee UVB 与模式计算结果的相对误差呈微弱下降趋势,这符合由于臭氧总量的增加而到达地面 UVB 辐照度降低的趋势,但 FSUVB 与 Yankee UVB 及 Brewer 均不同,整体呈现上升趋势,表明波长长于 315 nm 的杂散光的贡献随着臭氧总量上升而增加,这增加了 FSUVB 测值与 TUV 模式计算之间的误差。

表 2 南极中山站晴天 UVB,UVA 辐照度与 TUV 模式计算结果的比较($n=197$,太阳天顶角小于 80°)

Table 2 Statistical comparison of measured UVB,UVA irradiance and TUV calculation under cloud-free sky at Zhongshan Station, Antarctica($n=197$,SZA less than 80°)

误差	280~315 nm		280~320 nm		315~400 nm	
	Brewer	FSUVB	Brewer	Yankee UVB	Brewer	FSUVA
误差/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$	0.012 ± 0.038	0.052 ± 0.037	0.033 ± 0.096	-0.2 ± 0.2	1.1 ± 1.4	6.9 ± 3.6
相对误差/%	3.1 ± 8.5	30.1 ± 37.3	2.9 ± 6.8	-21.7 ± 19.1	3.4 ± 4.5	27.0 ± 6.4

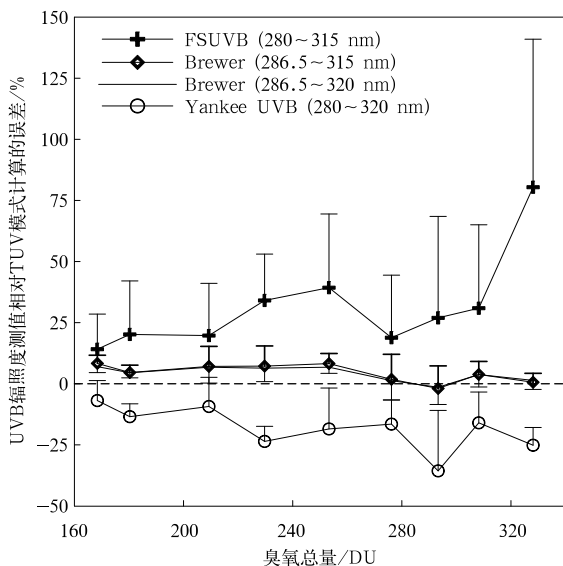


图 8 Brewer,FSUVB 和 Yankee UVB 测值与 TUV 晴天模式计算的相对误差与臭氧总量之间关系

Fig. 8 Relative errors of measured UVB irradiance from TUV calculations under cloud-free sky

3 讨论

由于地面太阳 UV 波段的光谱辐照度动态变化范围大且随波长积分的辐照度较低,对以硅光二极管为探测器的宽波段 UV 日射表而言,辐射表的灵敏度(响应时间)和探测信号的动态范围的技术要求远比普通的宽波段短波太阳辐射表的要求高。FSUVB 和 FSUVA 是采用滤光片与硅光管组合的日射表,其误差与仪器设计的原理有关,滤光片截止波长的变化、硅光二极管的探测性能随温度环境的变化以及标定所确定的灵敏度系数均可能造成较大的测值误差。本文通过 FSUVB 测值误差与臭氧总量的变化关系推测 FSUVB 的 UV 滤光片截止波长向波长增长的方向漂移,导致波长长于 315 nm 的杂散光增加,从而使 UVB 测值在低太阳天顶角、高臭氧总量时偏大。FSUVA 可能存在同样问题。

本文使用的 FSUVA 或 FSUVB 传感器及其工

作环境并未采用恒温措施。滤光片的透过率或硅光二极管的探测性能是否随温度环境变化而变化,还需要进行进一步的比对分析。改进型的 FSUVA-9 和 FSUVB-9 日射表因为传感器工作环境采取恒温装置应该使测量精度得到改善。另外,本文对 FSUVA 或 FSUVB 的标定依赖于 Kipp&Zonen 设计生产的宽波段 UV-S-AB-T 所测的 UVA 和 UVB 辐照度值的传递。这种标定方法值得商榷,因为仪器标定地点的大气臭氧总量和太阳天顶角与南极不完全相同。国际上对宽波段 UV 日射表(特别是 UVB)的标定通常综合臭氧总量和太阳天顶角两个因素^[32],其所确定的宽波段 UV 日射表的灵敏度系数通常是臭氧总量和太阳天顶角的函数,而非固定值。

虽然厂家说明书标明 Yankee UVB 能测量波段 280~320 nm 的辐照度值,但作者注意到 Yankee UVB 与 Brewer 在 286.5~318 nm 的辐照度测值最为接近(图略)。出现这种现象的原因很可能与该辐射表的 UV 滤光片的老化有关,因为 NiSO₄ 晶体滤光片遇到水汽分子极易潮解和老化,进而影响其 UV 光谱透过率,甚至包括波长的漂移,这种现象曾出现在我国老式的 Brewer 光谱仪上^[33]。本研究中 Yankee UVB 辐射表已使用 15 年,滤光片潮解老化是可能的。

4 结 论

本文所有 UV 日射表测值均能有效反映南极中山站太阳 UV 辐射的季节特征及“臭氧洞”对地面太阳 UVB 辐射的显著影响;FSUVA 和 FSUVB 测值高于 Brewer 测值,而 Yankee UVB 测值(波段 280~320 nm)偏低。晴天太阳天顶角小于 80°时各仪器 UV 测值与 TUV 模式计算比较($n=197$)的结论与各仪器与 Brewer 测值的比较结果一致。Brewer UV 测值呈现较高的稳定性和精密性,FSUVB 测值受杂散光影响明显。具体如下:

1) 以 Brewer 测值为参考,FSUVB 在波段 280~315 nm 的辐照度误差为 $0.04 \pm 0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (相对误差为 $(55.2 \pm 75.2)\%$);以 TUV 模式计算值为参考,FSUVB 的误差为 $0.05 \pm 0.04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (相对误差为 $(30.1 \pm 37.2)\%$)。春季“臭氧洞”期

间,FSUVB 辐照度测值低于 Brewer 测值,但随着臭氧总量的变化而呈上升趋势。

2) 以 Brewer 测值为参考,FSUVA 在波段 315~400 nm 的辐照度误差为 $4.3 \pm 2.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (相对误差为 $(23.0 \pm 5.9)\%$);以 TUV 模式计算值为参考,FSUVA 的误差为 $6.9 \pm 3.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (相对误差为 $(27.0 \pm 6.4)\%$)。FSUVA 辐照度测值误差不受臭氧总量的影响。

3) 以 Brewer 测值为参考,Yankee UVB 在波段 280~320 nm 的辐照度误差为 $-0.15 \pm 0.15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (相对误差为 $(-31.8 \pm 22.2)\%$);以 TUV 模式计算值为参考,Yankee UVB 的误差为 $-0.15 \pm 0.22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (相对误差为 $(-22.0 \pm 19.1)\%$)。Yankee UVB 系统低于 Brewer 测值,但受臭氧总量影响并不明显。

4) 以晴天条件下 TUV 模式的计算结果为参考,Brewer UV 辐照度测值在波段 286.5~315 nm, 286.5~320 nm 以及 315~400 nm 的误差分别为 $0.012 \pm 0.038 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, $0.033 \pm 0.096 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $1.09 \pm 1.42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 相对误差分别为 $(3.1 \pm 8.5)\%$, $(2.9 \pm 6.8)\%$ 和 $(3.4 \pm 4.7)\%$ 。

致 谢:中国第 33 次南极考察队中山站越冬队对仪器安装调试给予了支持。

参 考 文 献

- [1] WMO. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observations. 7th Edition, Geneva: WMO, 2014.
- [2] Kerr J B, McElroy T C. Evidence for large upward trends of ultraviolet-B radiation linked to ozone depletion. *Science*, 1993, 262: 1032-1034.
- [3] Lubin D, Frederick J E, Booth C R, et al. Measurements of enhanced springtime ultraviolet radiation at Palmer Station, Antarctica. *Geophys Res Lett*, 1989, 16: 783-785.
- [4] 吕达仁, 李卫, 李福田, 等. 长春地区紫外光谱(UV-A, UV-B)辐射观测和初步分析. *大气科学*, 1996, 20(3): 343-351.
- [5] 沈元芳, 况石. 紫外线模式预报方法的研究和试验. *应用气象学报*, 2002, 13(增刊 I): 223-231.
- [6] 卞林根, 陆龙骅. 南极长城站和中山站辐射特征的研究. *应用气象学报*, 1998, 9(2): 160-168.
- [7] 胡筱欣, 陆龙骅, 张凤英, 等. 南极春季臭氧的 TOVS 反演及其与 Brewer 观测的比较. *应用气象学报*, 1996, 7(4): 437-442.
- [8] 孙治安, 翁笃鸣. 青藏高原地区地表及行星反射率. *应用气象学报*, 1994, 5(4): 394-401.

- [9] 郑向东, 汤洁, 李维亮, 等. 拉萨地区 1998 年夏季臭氧总量及垂直廓线的观测研究. *应用气象学报*, 2000, 11(2): 173-179.
- [10] 卓嘎, 徐祥德, 陈联寿. 青藏高原对流云团东移发展的不稳定特征. *应用气象学报*, 2002, 13(4): 448-456.
- [11] 徐祥德, 陈联寿. 青藏高原大气科学试验研究进展. *应用气象学报*, 2007, 17(6): 756-772.
- [12] 蔡兆男, 王永, 郑向东, 等. 利用探空资料验证 GOME 卫星臭氧数据. *应用气象学报*, 2009, 20(3): 337-345.
- [13] 陈树, 郑向东, 林伟立, 等. 西藏当雄地基紫外线指数观测研究. *应用气象学报*, 2015, 26(4): 482-491.
- [14] 刘梦琪, 郑向东, 赵春生. 夏季西藏 4 个站点大气向下长波辐射观测分析. *应用气象学报*, 2018, 29(5): 596-608.
- [15] Berger D A. The sunburning ultraviolet-meter Design. *Photochemistry and Photobiology*, 1976, 24: 587-593.
- [16] Dichter B K, Beaubien A F, Beaubien D J. Development and characterization of a new solar ultraviolet-B irradiance detector. *J Atmos Oceanic Technol*, 1993, 10(3): 337-344.
- [17] 张晓春, 汤洁, 王炳忠. 用 Yankee(扬基)UVB-1 型紫外辐射表测量大气中的紫外 B 辐射. *青海环境*, 2003(3): 100-104.
- [18] WMO. Report of the Second International UV Filter Radiometer Calibration Campaign UVC-II at Davos, Switzerland, May 25th-October 5th, 2017. TD-No. 240, Geneva: WMO, 2018.
- [19] Leszczynski K, Jokela K, Ylianttila L, et al. Erythemal weighted radiometers in solar UV monitoring: Results from the WMO/STUK inter comparison. *Photochemistry and Photobiology*, 1998, 67: 212-221.
- [20] 张保洲, 王术军, 李子英. 全天候气象专用 B 波段紫外辐射计的研制. *计量学报*, 2006, 27(1): 25-27.
- [21] 中华人民共和国国家标准. 紫外红斑效应参照谱、标准红斑剂量和紫外指数. GB/T 21005—2007, 2007.
- [22] 汤洁, 王炳忠, 姚萍. 国产紫外辐射表仪器性能测试(I): 室内静态性能测试. *太阳能学报*, 2005, 26(2): 183-186.
- [23] 汤洁, 王炳忠, 刘广仁. 国产紫外辐射表仪器性能测试(II): 室外测试及与国外同类产品比较. *太阳能学报*, 2005, 26(3): 313-320.
- [24] 郑向东, 周秀骥, 陆陇骅, 等. 1993 年南极中山站“臭氧洞”的观测研究. *科学通报*, 1994, 40(6): 533-535.
- [25] 江苏省无线电科学研究所有限公司. FSUV 系列紫外辐射传感器. 2019.
- [26] Madronich S. The Atmosphere and UV-B Radiation at Ground Level. *Environmental UV Photobiology*, Plenum Press, 1993: 1-39.
- [27] Lakkala K, Arola A, Heikkilä A, et al. Quality assurance of the Brewer spectral UV measurements in Finland. *Atmos Chem Phys*, 2008, 8: 3369-3383.
- [28] Tomasi C, Kokhanovsky A A, Lupi A, et al. Aerosol remote sensing in polar regions. *Earth-Science Reviews*, 2005, 140: 104-158.
- [29] Koepke I P, Bais A, Balis D, et al. Comparison of models used for UV index calculations. *Photochemistry and Photobiology*, 1998, 67(6): 657-662.
- [30] Wang P, Lenoble J. Comparison between measurements and modeling of UV-B irradiance for clear sky: A case study. *Applied Optics*, 1994, 33(18): 3964-3971.
- [31] 陈爱军, 周芬, 梁学伟等. 中国地区 MODIS 地表反照率反演结果的时空分布研究. *大气科学学报*, 2018, 41(2): 267-274.
- [32] Bodhaine B A, Dutton E G, McKenzie R L, et al. Calibrating broadband UV instruments—Ozone and solar zenith angle dependence. *J Atmos Oceanic Technol*, 1998, 15(4): 916-926.
- [33] 郑向东, 韦小丽. 中国 4 个地点地基与卫星臭氧总量长期观测比. *应用气象学报*, 2010, 21(1): 1-10.

Comparison of Solar Ultraviolet Irradiance Measurements at Zhongshan Station, Antarctica

Zheng Xiangdong¹⁾ Cheng Haixuan²⁾

¹⁾ (Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

²⁾ (Department of Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract

A comparative analysis is presented on surface solar ultraviolet B (UVB) band and ultraviolet A (UVA) irradiance measured by 3 UV broadband pyranometers: FSUVA(315—400 nm), FSUVB(280—315 nm) provided by Jiangsu Radio Scientific Institute Co. LTD (CJRSI), American Yankee UVB(280—

320 nm), and Brewer ozone spectrophotometer, placed at Zhongshan Station, Antarctica. Using data of Brewer ozone spectrophotometer in 2017 as a reference, results show that, for UVB(280–315 nm) irradiance, the error of FSUVB is averagely $(55 \pm 75)\%$ but its irradiance is lower during the “ozone hole” period, indicating that domestic made FSUVB broadband radiometer is less sensitive to the ozone layer thinning. Furthermore, the irradiance relative error of FSUVB shows a certain upward trend with the increase of total atmospheric ozone, indicating an over-measured UVB irradiance by the FSUVB pyranometer in regions with normal ozone concentration, such as the area of middle-low latitudes including China. As a contrast, the error of Yankee UVB (280–320 nm) is averagely $(-31 \pm 22)\%$ lower than that of Brewer measured, however, the relative error and total ozone variation are unrelated. The under-measured UVB irradiance from the Yankee UVB pyranometer is attributed to the system calibration error. Since Brewer spectral UV measurement is limited within 286.5–363 nm, a so-called UV correction factor, on the basis of empirical ratio of spectral irradiance at the wavelength longer than 363 nm to the Brewer measured irradiance at 363 nm, is applied to make up Brewer spectral irradiance gap of 363.5–400 nm with wavelength resolution of 0.5 nm for constructing Brewer entire spectral UVA (315–400 nm) irradiance. The error of FSUVA is averagely $(23 \pm 59)\%$ when Brewer UVA irradiance is used as the reference. With tropospheric Ultraviolet visible (TUV) radiation model calculations under cloud-free and the sun zenith angle (SZA) less than 80° as references, irradiance errors measured by FSUVB, Yankee UVB and FSUVA are $(30 \pm 37)\%$, $(-22 \pm 19)\%$ and $(27 \pm 6.4)\%$, respectively, in 197 cases, while the average of differences between Brewer and TUV calculations are respectively $(3.4 \pm 8.5)\%$ in UVB band of 286.5–315 nm, $(2.9 \pm 6.8)\%$ in UVB band of 286.5–320 nm and $(3.4 \pm 4.5)\%$ in UVA band of 315–400 nm, proving the method of Brewer UVA correction factor is rational. Again, only the relative error of FSUVB measurements referenced to TUV calculations displays an evident increasing trend with the growth of total ozone. Mechanisms of over-measured solar irradiances from both domestic made broad-band UV pyranometers are not fully identified. Calibration methods needed to be improved with consideration of variable SZA and total ozone. In addition, the stray light at longer wavelengths should have a significant influences on the pyranometer's performances and this stray light need to be eliminated in further instrument improvement. For FSUVB, its less sensitiveness to the solar UVB irradiance during the period of “ozone hole” still needs to be resolved.

Key words: FSUVA/FSUVB pyranometer; Brewer spectrophotometer; TUV mode calculation; UV irradiance; Zhongshan Station, Antarctica