

闭建荣, 黄建平, 高中明, 等. 民勤地区紫外辐射的观测与模拟研究[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 413—422, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00012.

## 民勤地区紫外辐射的观测与模拟研究

闭建荣<sup>1</sup>, 黄建平<sup>1</sup>, 高中明<sup>1</sup>, 史晋森<sup>1</sup>, 马越界<sup>2</sup>, 张武<sup>1</sup>

(1. 兰州大学 大气科学学院/半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000;

2. 鄂尔多斯市气象局, 鄂尔多斯 017000)

**摘要:** 利用2010年春季民勤加强观测实验的地面辐射资料, 分析了民勤沙漠干旱区总紫外辐射的变化特征, 并对该地区的紫外辐射进行了估算和模拟。结果表明, 紫外辐射和太阳总辐射表现出一致的变化特征, 层云对两者的反射能力比卷云强。2010年6月紫外辐射的瞬时最大值为  $55.92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 平均日总量为  $1.07 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ , 紫外辐射与太阳辐射比例的平均值为 4.7%, 其变化范围在 3%~9% 之间。根据晴空指数( $K_t$ )与最大紫外辐射( $UV_0$ )及太阳总辐射( $G$ )建立了民勤地区紫外辐射( $UV$ )的估算方程:  $UV = 2.94 + 1.22 \times (K_t \times UV_0)$  和  $UV = 0.047G$ , 均能较好地估计该地区的地表紫外辐射。由于受输入参数精度的限制, 辐射传输模式 SBDART 低估了晴空条件下的紫外辐射, 低估的总平均值为  $1.12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (约 5.6%), 变化范围在  $-2.8 \sim 0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  之间。

**关键词:** 紫外辐射; 沙漠干旱区; 晴空指数; 辐射传输模式

**文章编号:** 1000-0534(2014)02-0413-10 **中图分类号:** P422.6<sup>+2</sup> **文献标志码:** A

**doi:** 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00012

### 1 引言

紫外辐射( $UV$ )是太阳光谱中在 100~400 nm 之间的一个电磁波段, 根据不同波长的生物效应差异, 通常进一步分为  $UV-A$  (315~400 nm)、 $UV-B$  (280~315 nm) 和  $UV-C$  波段(100~280 nm)。平流层中的臭氧几乎完全吸收了  $UV-C$  和大部分  $UV-B$ , 因此, 到达近地面的紫外辐射主要包含  $UV-A$  和少量  $UV-B$  波段能量。虽然紫外辐射在太阳总辐射中所占比例较小(约 8%), 但近几十年南极春季臭氧层空洞的出现、北半球中高纬度臭氧柱总量的持续减少和青藏高原上空夏季臭氧低值区的出现将导致到达地面紫外辐射增加<sup>[1-3]</sup>, 进而可能严重影响人类健康及生物体的生存环境, 大大降低农作物的产量<sup>[4]</sup>。同时, 紫外辐射被平流层臭氧及其他气体的强烈吸收是中高层大气温度增加的一个关键因素。因此, 紫外辐射的观测研究已经引起了全世界科学家和各国政府的广泛关注<sup>[5-7]</sup>。

太阳紫外辐射经过大气层时, 除了受观测站地

理位置和太阳高度角影响外, 还受臭氧的选择性吸收(如 Hartley 带、Huggins 带)和云、气溶胶粒子、空气分子的散射和吸收及地表反射等作用。在重工业地区, 还可能与污染物气体发生光化学反应, 如  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  等<sup>[8]</sup>。因此, 需要在全球范围内对紫外辐射进行长期连续监测, 并结合模式研究才有可能全面了解到达地面的紫外辐射与诸多影响因子之间的关系<sup>[5-6]</sup>。国际上针对紫外辐射的观测已经进行了大量研究, 例如美国从 1987 年起开始用紫外辐射光谱计在南极地区布网监测紫外辐射; 1991 年由欧共体建立的“确定  $UV-B$  辐射监测网标准”科学计划, 极大地提高了欧洲地区的紫外观测水平<sup>[9]</sup>。自 20 世纪 90 年代以来, 中国科学家也开展了大量的紫外辐射观测研究, 季国良等<sup>[10]</sup>利用 1982—1983 年在青藏高原进行为期一年多紫外辐射的观测资料, 研究了高原地区紫外辐射的变化特征。由中国科学院大气物理研究所和长春光机所合作研制的太阳—大气紫外光谱辐射计(SAUVS), 分别在长春和北京地区进行了长期观测, 研究了臭氧层变

收稿日期: 2012-06-14; 定稿日期: 2013-01-22

资助项目: 国家重大研究计划项目(2012CB955302); 国家自然科学基金项目(41305025); 中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2013-207, lzujbky-2013-ct05); 半干旱气候变化教育部重点实验室(兰州大学)开放课题基金

作者简介: 闭建荣(1984—), 男, 广西大新县人, 工程师, 主要从事大气辐射与气候变化研究。E-mail: bijr@lzu.edu.cn

薄的效应<sup>[6, 11]</sup>。江灏等<sup>[12]</sup>根据 1990 年 10 月—1992 年 10 月张掖和临泽站的紫外辐射资料分析了黑河地区紫外辐射的气候学特征, 结果发现, HEIFE 绿洲地区紫外辐射年平均总量( $0.48 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )约为拉萨的一半, 紫外辐射占总辐射的年平均比例为 2.9%。在拉萨、五道梁、西宁、海北等高原地区也相继进行紫外辐射的观测研究<sup>[13-15]</sup>。白建辉等<sup>[16-17]</sup>分析了北京地区紫外辐射的长期变化特征表明, 北京地区紫外辐射总量呈逐年下降趋势。此外, 在紫外辐射的控制因子及其可能影响机制等方面也进行了详细的分析<sup>[7, 18]</sup>。胡波等<sup>[19-20]</sup>利用中国生态系统网开展的 2004—2005 年 20 多个站点紫外辐射观测资料, 分析了中国紫外辐射占总辐射比值的时空分布特征, 并指出该比值的变化具有显著的区域和季节性特征。吉廷艳等<sup>[21]</sup>分析了贵阳地区太阳紫外辐射特征与主要影响因子的关系。

在模式计算和经验估算模型方面, 国内学者也进行了大量工作。王普才等<sup>[22-23]</sup>利用改进的辐射传输模式 DISORT 发展了一个适用于晴空和云天条件下能比较准确模拟地面紫外辐射的辐射传输方案。此外, 许多学者结合总辐射、臭氧及水汽的观测数据, 应用回归方程建立了不同地区紫外辐射的经验公式及估算模型<sup>[10-12, 24-26]</sup>。但由于西北地区观测站稀少、监测时间短, 大部分地区缺乏实测资料, 尤其是对民勤沙漠干旱区紫外辐射特征的研究较少。因此, 本文利用 2010 年春季民勤加强观测试验的地面辐射资料, 分析民勤沙漠地区紫外辐射的特征, 为进一步了解中国不同地区紫外辐射的变化规律提供可靠的科学依据。

## 2 观测站介绍和资料选取

### 2.1 观测站介绍

2010 年 4—6 月兰州大学大气科学学院在甘肃

省民勤治沙综合观测站进行了一次沙尘暴加强观测试验。本次试验包含大量高精度的地面辐射和地基遥感仪器, 其中部分仪器参数及观测变量如表 1 所示。

本次试验地点选在民勤荒漠草地国家生态站二号观测站附近 ( $38.61^\circ \text{N}$ ,  $102.96^\circ \text{E}$ , 海拔 1373 m), 它是一个被干旱荒漠区包围的孤立小绿洲, 地处巴丹吉林沙漠东南缘的西沙窝。民勤县位于河西走廊东北部、石羊河流域最下游, 是巴丹吉林与腾格里两大沙漠前缘的交汇区, 属于温带大陆性极干旱气候。多年平均气温为  $8.3^\circ \text{C}$ , 具有较大的季节性和昼夜温差; 年平均降水量为 113.0 mm, 主要集中在 6—9 月 (占全年的 75%); 年平均蒸发量为 2604 mm, 约为降水量的 23 倍。这些表明该地区具有充足的日照和较强的紫外线。

### 2.2 仪器介绍

本文使用的仪器由美国 Eppley 实验室研制的总紫外辐射表 (TUVB)、高精度短波辐射表 (Pyranometer, PSP) 和直接辐射表 (Normal Incidence Pyrheliometer, NIP), 后两者固定在双轴太阳跟踪器 (型号 2AP) 上, 可分别测量总紫外辐射、太阳散射辐射和直接辐射等通量。这些设备均安装在约离地面 4 m 的移动拖车顶部的标准辐射平台上, 周围视野开阔、无高障碍物遮挡。这些辐射表是最新购置的, 在野外试验前已由厂家进行了严格标定。比如, 紫外辐射表的灵敏度为  $174 \mu\text{V} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ , 时间响应为毫秒量级, 余弦响应为  $\pm 3.5\%$  (在太阳天顶角为  $0^\circ \sim 70^\circ$  时), 测量精度为  $\pm 2\%$ , 测量光谱范围为 295 ~ 385 nm。其他辐射表和仪器的规格参数详见表 1。数据采集使用美国 Campbellsci 公司生产的 CR3000 采集器, 每 2 s 记录一次数据, 采样频率为每分钟一次。每天日出前 (一般为 07:30, 北京时, 下同) 对仪器镜头进行清洁维护。

表 1 仪器参数和观测变量

Table 1 Instrumental parameters and variables of measurements

仪器名称	厂家/型号	观测变量	观测精度
紫外辐射表	Eppley, TUVB	紫外辐射 ( $0.295 \sim 0.385 \mu\text{m}$ )	$\pm 2\%$
总辐射表	Eppley, PSP	太阳总辐射 ( $0.285 \sim 2.8 \mu\text{m}$ )	$\pm 3\%$
散射辐射表		散射辐射 ( $0.285 \sim 2.8 \mu\text{m}$ )	
直接辐射表	Eppley, NIP	直接辐射 ( $0.285 \sim 2.8 \mu\text{m}$ )	$\pm 2\%$
太阳跟踪器	Kipp and Zonen, 2AP	跟踪太阳, 方位角 $0^\circ \sim 360^\circ$ , 高度角 $0^\circ \sim 90^\circ$	$< 0.05^\circ$
全天空成像仪	YES Inc, TS1880	24 位 JPEG 彩色图像	352 × 288 像素
太阳光度计	CIMEL, CE-318	340 ~ 1020 nm 共 7 个波段气溶胶光学特性	AOD: 0.01 ~ 0.02

## 2.3 资料选取

所选臭氧资料采用美国国家航空航天局日平均的 TOMS 卫星资料 (Ozone Monitoring Instrument, NASA Aura mission)。水汽资料来自民勤县气象台站 (38.63°N, 103.08°E, 海拔 1367 m) 的常规探空资料。民勤气象台站位于治沙站东北面约 12 km, 试验期间每天 08:00 和 20:00 放两次探空。水汽柱含量可结合大气压、温度和相对湿度廓线和 McCarty<sup>[27]</sup> 提出的计算方案获得。

## 2.4 数据处理

选取资料时间为 2010 年 5 月 10 日—6 月 20 日, 在处理时剔除了仪器维护时段的数据。辐射仪器的“零点漂移”可能会造成夜间出现负的输出值, 本文结合夜间辐射值、传感器内罩、外罩温度和最小二乘法对“零点偏移”进行订正<sup>[26]</sup>, 以减少造成的测量误差。由于太阳高度角较小时, 余弦响应会给水平方向的辐射观测带来较大的误差。因此, 本文利用太阳直接辐射与散射辐射之和代替水平方向的总辐射, 同时只考虑太阳高度角  $\geq 10^\circ$  时段的数据。多波段太阳光度计 CE-318 可以提供气溶胶光学特性参数 (如光学厚度、波长指数、单次散射比和不对称因子), 作为辐射传输模式的输入。此外, 全天空成像仪 TSI-880 每分钟能准确提供  $352 \times 288$  像素、24 位 JPGE 彩色天空图像 1 张, 可以获取晴空、高云、低云、沙尘和降雨等数据。同时, 每隔 1 h 人工记录 1 次云状、云量、天气状况和能见度等信息, 为区分晴空、多云和阴雨天气提供了丰富的资料。

## 3 结果分析

### 3.1 紫外辐射的变化特征

从民勤地区太阳总辐射和紫外辐射的平均日变化 (图 1) 中可以看出, 两者的日变化明显。总辐射变化幅度为  $26 \sim 372 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 而紫外辐射则为  $1.6$

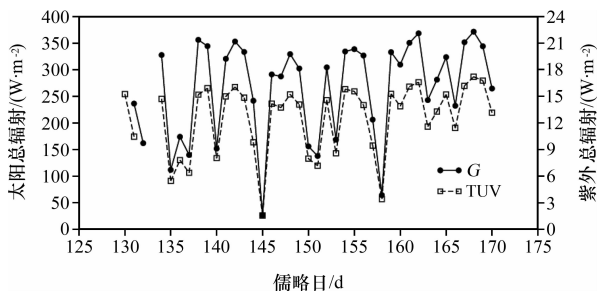


图 1 民勤地区太阳总辐射和紫外辐射的平均日变化  
Fig. 1 Averaged daily variation of total solar radiation and total ultraviolet radiation in Minqin region

$\sim 17.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 这主要是由天气状况决定的。在整个观测时期, 紫外辐射与太阳总辐射表现出非常一致的日变化特征。即晴空条件下两者的平均日变化都保持较高的辐射值, 而低值的出现与多云、阴雨天气过程相对应。两者最大的日平均值都出现在 6 月 17 日 (全天晴空), 分别为  $372.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $17.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。观测期间总的日平均值分别为  $267.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $12.4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

不同类型的云对短波辐射强迫具有不同的辐射效应<sup>[28]</sup>。为更好地了解云对紫外辐射与太阳总辐射的影响作用, 选取一个典型例子进行分析。图 2 为三种不同天气条件下 (晴空、卷云和阴天) 民勤地区太阳总辐射与紫外辐射的日变化曲线, 其中 5 月 22 日为全天晴空、6 月 3 日为全天卷云 (07:00—09:00 时段出现少量积云, 云量为 3 成; 09:00—19:00 时段全天空被薄卷云覆盖, 云量为 1 成)、5 月 30 日为全天阴天 (全天空被层云和雨层云覆盖, 云量为 10 成)。晴空条件下总辐射和紫外辐射呈早晚小、中午大的近抛物线对称分布特征, 这主要受太阳高度角的影响。即早晚时段太阳高度角较小, 太阳辐射经过的大气路程较长, 分子散射对紫外辐射消光较强, 到达地面的紫外辐射最小, 而随着高度角的增加, 大气光程变短, 太阳/紫外辐射逐渐增大, 正午时达到最大值, 之后又随着高度角的减小而迅速减小。由于云的反射作用, 紫外辐射的变化呈很不规则的形状。积云存在时辐射值波动比较大, 而阴天的变化振幅相对较小。卷云对总辐射和紫外辐射的最大衰减分别为 5% 和 6% (相对晴空条件, 下同), 而层云对两者的消光能力分别为 58.8% 和 52.1%。这表明层云对太阳辐射/紫外辐射的反射能力比卷云要强得多。三种典型天气条件下紫外辐射的日总平均值分别为  $16.05$ ,  $15.80$  和  $7.97 \text{ MJ} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

### 3.2 控制因子与紫外辐射的关系

Halthore et al<sup>[29]</sup> 研究发现, 根据无线探空资料反演得到的水汽含量与地基微波辐射仪的观测误差在 10% 以内。Bi et al<sup>[26]</sup> 研究表明, 试验期间民勤站太阳光度计反演的柱总水汽量与同期的无线探空结果一致, 日平均值分别为  $1.02 \pm 0.37 \text{ cm}$  和  $1.07 \pm 0.36 \text{ cm}$ 。图 3 给出了民勤地区观测期间臭氧柱总量和水汽柱含量与紫外辐射的平均日变化关系。由图 3a 中可以看出, 臭氧柱总量的平均日变化与紫外辐射呈相反的变化趋势, 即臭氧处于低值区 ( $300 \sim 330 \text{ DU}$ ) 时, 紫外辐射维持较高的值 ( $14 \sim$

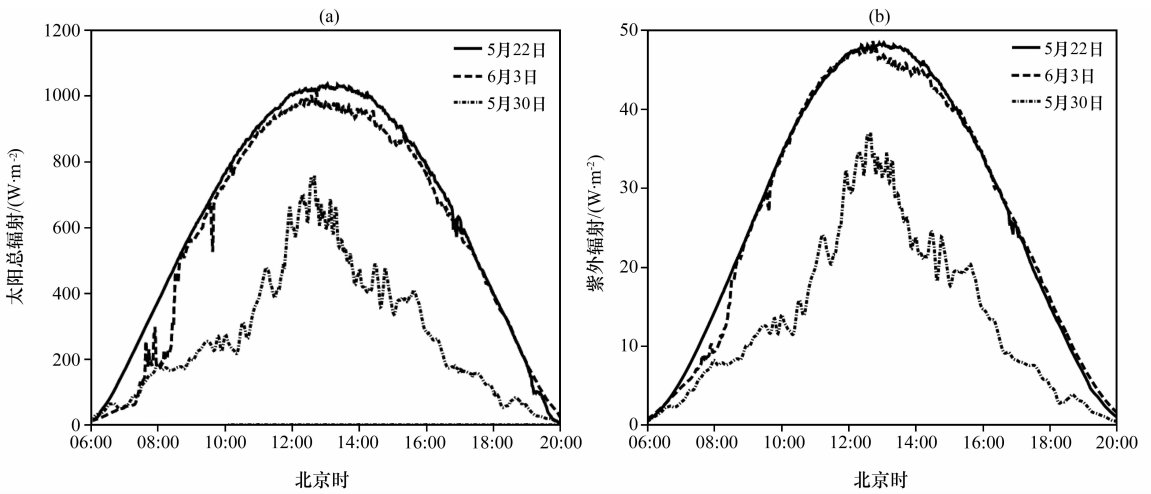


图2 不同天气条件下(晴空、卷云和阴天)民勤地区太阳总辐射(a)和紫外辐射(b)日变化  
 Fig. 2 Diurnal variation of total solar radiation(a) and total ultraviolet radiation(b) under various conditions (clear-sky, cirrus and cloudy days) in Minqin region

18 W · m<sup>-2</sup>); 当臭氧值增加时, 地面紫外辐射将明显减少, 如 5 月 17 日和 6 月 2 日臭氧总量分别为 460 DU 和 408 DU, 对应的紫外辐射值为 6.38 W · m<sup>-2</sup>和 8.58 W · m<sup>-2</sup>。然而, 紫外辐射的最低值不是出现在臭氧的最高值, 而是出现在阴雨天气。比如, 5 月 25 日和 6 月 7 日(均为阴天)紫外辐射分别为 1.56 W · m<sup>-2</sup>和 3.42 W · m<sup>-2</sup>, 对应的臭氧值分别为 317 DU 和 317 DU。这说明除了受臭氧柱总量的影响外, 天气状况也是影响地面紫外

辐射的一个重要因子。

虽然水汽不能直接吸收紫外辐射, 但可以通过与水汽有关的各种光化学过程(如 OH 自由基)间接影响到达地面的紫外辐射<sup>[18]</sup>。从图 3b 中可以看出, 水汽柱含量与紫外辐射的平均日变化也表现出明显的负相关关系。值得注意的是, 探空资料观测到的大气压、温度和湿度廓线能从一定程度上代表了大气状况的变化特征。即水汽含量的低值一般对应晴空天气, 而高值对应多云和阴雨天气。水汽含

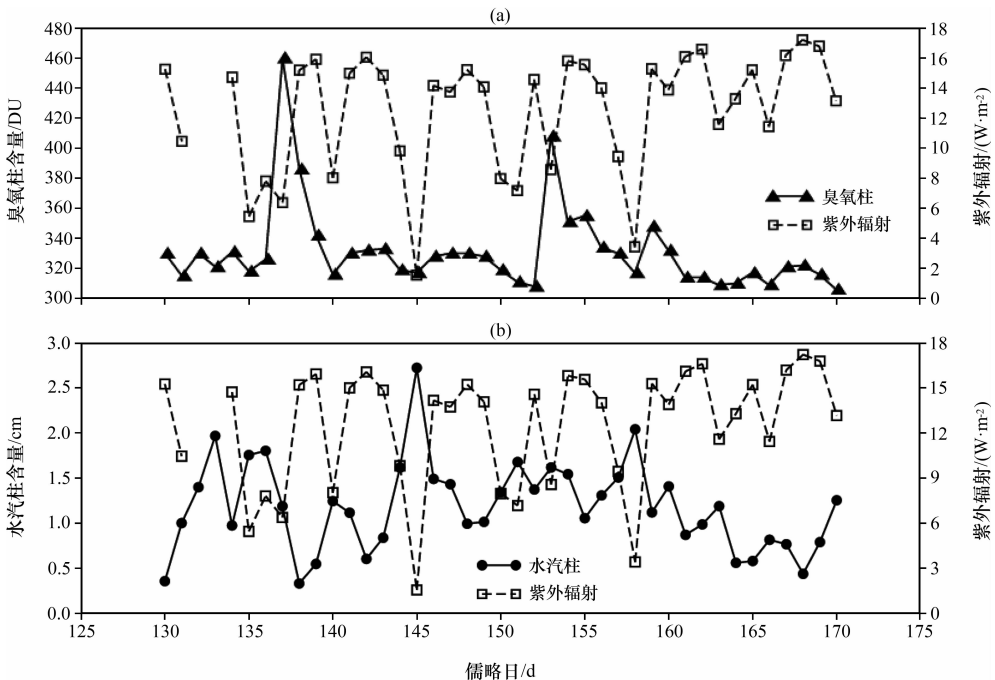


图3 民勤地区臭氧柱总量(a)、水汽柱含量(b)与紫外辐射的日平均日变化  
 Fig. 3 Averaged daily variation of columnar ozone amount(a), water vapor column content(b) and total ultraviolet radiation in Minqin region

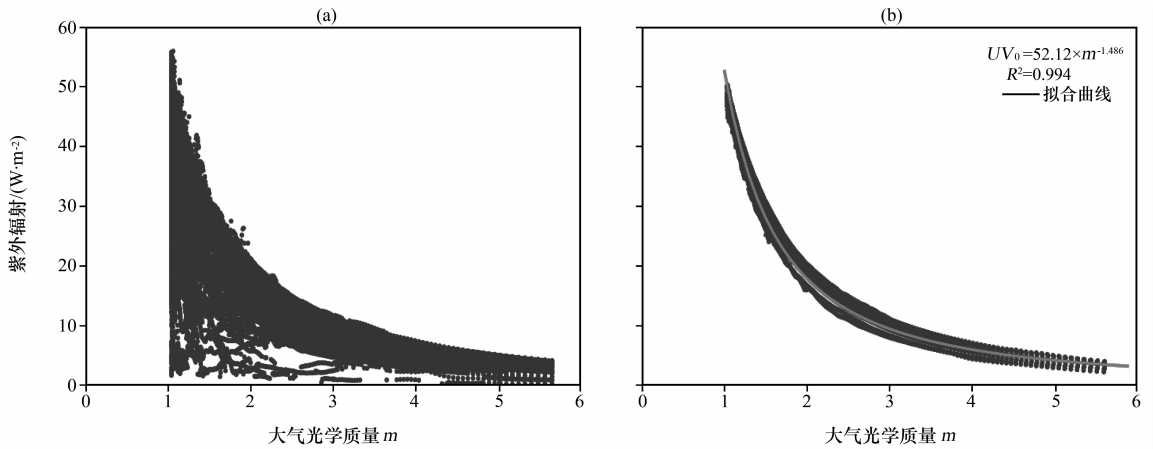


图 4 在全天空(a)和晴空(b)条件下民勤地区紫外辐射与大气光学质量的散点分布

Fig. 4 Scatter plots of total ultraviolet radiation and air optical mass under all sky(a) and clear-sky(b) conditions in Minqin region

量较低时紫外辐射值相对较高, 而水汽含量较高时紫外辐射处于低值范围, 这与前面的结论相一致。对比图 3a 和 3b 可知, 臭氧柱总量和天气状况能同时影响到达近地面的紫外辐射, 晴空条件下臭氧的影响表现得更明显, 而多云和阴天天气由于云的反射作用, 天气状况对紫外辐射的影响相对更大。

大气光学质量被定义为太阳光从天顶角  $\theta$  (即高度角的余角) 入射与从天顶角  $\theta = 0^\circ$  处入射时整层大气光学厚度的比值。根据 Kasten et al<sup>[30]</sup> 提出的近似公式计算大气光学质量, 图 4 给出了紫外辐射与大气光学质量在全天空(指所有晴空和云的情况, 下同)和晴空条件下的变化关系。从图 4 中可以看出, 全天空条件下, 紫外辐射随大气光学质量的变化幅度很大, 离散分布大。这说明太阳天顶角不是决定到达地面紫外辐射的唯一控制因子。随光学质量的增加, 紫外辐射呈整体较小的特征。本文结合全天空成像仪和辐射资料, 选取了 5 月 22 日

和 6 月 17 日 2 个完整的晴天及 5 月 18 日, 6 月 4, 8, 10 和 11 日 5 个晴空的瞬时数据研究了最大紫外辐射(晴空条件)与大气光学质量的关系<sup>[26, 31]</sup>。晴空条件下最大紫外辐射与光学质量存在幂指数变化关系, 即随着光学质量的增加, 紫外辐射呈幂指数减少(图 4b), 其拟合方程为  $UV_0 = 52.12 m^{-1.486}$ , 相关系数为 0.994。胡波等<sup>[24]</sup>利用 2004 年 3—12 月北京市总辐射与紫外辐射的观测数据和大气质量数得到类似的拟合方程  $UV_0 = 36.00 m^{-1.277}$ , 拉萨的拟合方程为  $UV_0 = 50.71 m^{-1.02}$ , 海北站的为  $UV_0 = 51.09 m^{-1.28}$ , 指出拟合系数主要由不同地区的气候状况和地理参数决定<sup>[19]</sup>。

### 3.3 紫外辐射占总辐射的比例

图 5 为民勤地区紫外辐射占太阳总辐射的比例与总辐射瞬时值在全天空和晴空条件下的关系。由图 5 知, 太阳辐射值  $< 600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  时, 其比例与

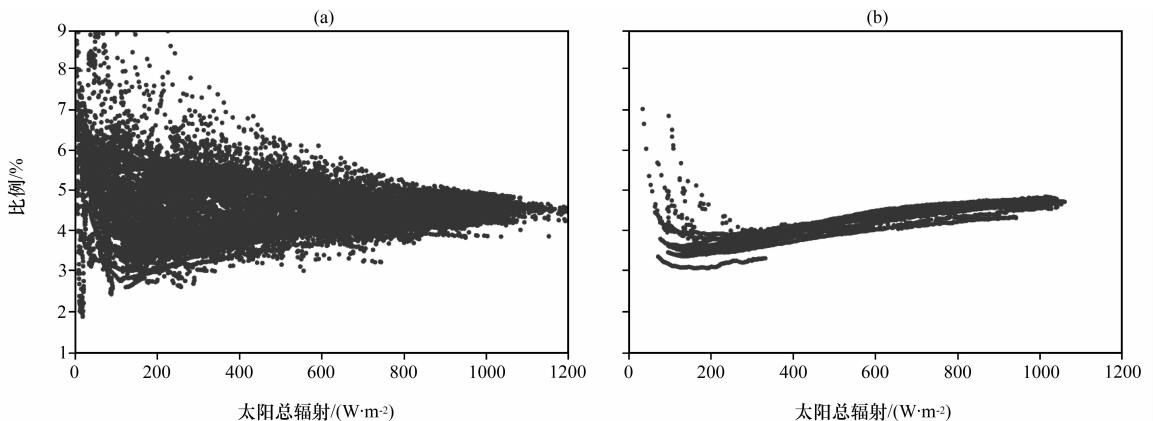


图 5 在全天空(a)和晴空(b)条件下民勤地区紫外辐射占太阳总辐射的比例与太阳总辐射瞬时值的散点分布

Fig. 5 Scatter plots of the ratio of total ultraviolet radiation to total solar radiation and broadband global radiation under all sky(a) and clear-sky(b) conditions in Minqin region

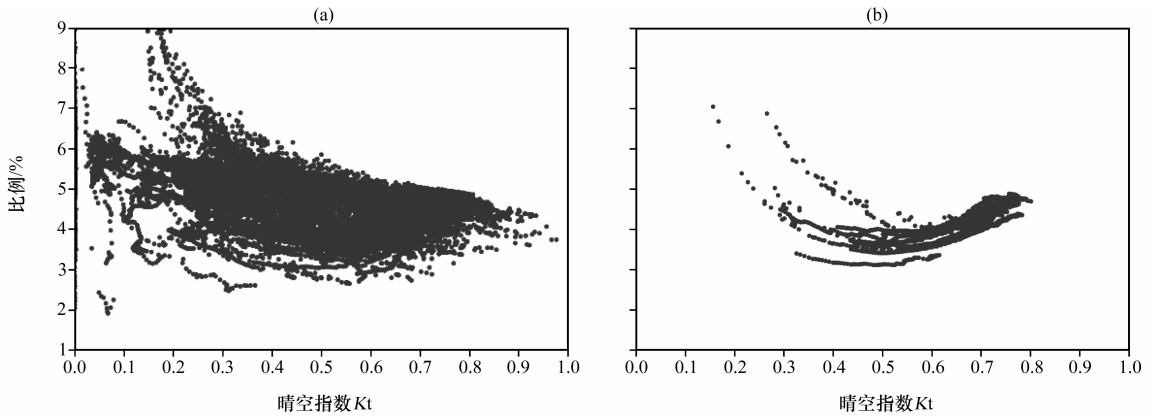


图6 在全天空(a)和晴空(b)条件下民勤地区紫外辐射占太阳总辐射的比例与晴空指数  $K_t$  的散点分布  
Fig. 6 Scatter plots of the ratio of total ultraviolet radiation to total solar radiation and global broadband hemispherical transmittance ( $K_t$ ) under all sky (a) and clear-sky (b) conditions in Minqin region

总辐射存在较大的离散性, 比值主要集中在 3% ~ 9% 的范围内; 总辐射的低值主要归因于小的太阳高度角或多云及阴雨天气状况的影响。太阳辐射值  $> 600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  时, 比值随着总辐射的增加呈略微上升的趋势, 逐渐集中在 4.7% 附近。这些特征在图 5b 的晴空条件下表现得更为明显。从图 5b 中还可以看出, 高度角较小时, 紫外辐射与总辐射的比值与总辐射的大离散度仍然显著, 而且太阳辐射  $> 400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  时, 比值随着总辐射的增加呈现明显的上升趋势, 最终趋于 4.7%。

晴空指数  $K_t$  定义为地面观测到水平方向的总辐射与大气层顶总辐射的比值。它可以表征云和气溶胶对辐射衰减(吸收和散射)的能力<sup>[24]</sup>。按照晴空指数的大小, 把天空状况大致分为晴天 ( $K_t \geq 0.6$ )、多云 ( $0.4 \leq K_t < 0.6$ ) 和阴雨天 ( $K_t < 0.4$ )。图 6 为全天空和晴空条件下民勤地区紫外辐射占总辐射的比例和晴空指数的关系。晴空指数  $K_t > 0.6$  时, 即晴空条件下, 比值趋于稳定, 基本维持在 4.7% 附近, 比黑河绿洲区<sup>[12]</sup> 的 2.7% 和北京市<sup>[24]</sup> 的 3% 偏大, 但与五道梁<sup>[14]</sup> 的 4.5% 和拉萨地区<sup>[19]</sup> 的 4.6% 接近。 $K_t$  较小时, 比值的变化辐散度较大, 较小的  $K_t$  对应于低的太阳高度角或多云及阴雨天气, 这与前面的讨论相一致。从图 6b 中还可以看出,  $K_t > 0.6$  时(晴空条件), 比值随着晴空的增加也呈现明显的上升趋势, 最终趋向于 4.7%。

图 7 给出了民勤地区紫外辐射占总辐射比例的平均日变化情况。从图 7 中可以看出, 由于受天气状况、臭氧和气溶胶等的综合影响, 比例的日变化显示了较强的波动特征, 晴空条件时基本保持在 4.5% 附近变化, 多云或阴雨天气时比例均  $> 5\%$ ,

最大可达 6% (出现在 5 月 25 日的阴雨天), 沙尘天气时比值只有 4% 左右(5 月 24 日为浮尘天气)。这可能是沙尘过程中产生大量的尘土颗粒能较强地散射紫外辐射; 而阴雨天气是由于水汽大量吸收红外辐射。观测期间民勤地区紫外辐射占太阳辐射比例的总平均值为 4.71%, 标准偏差为 0.33%。

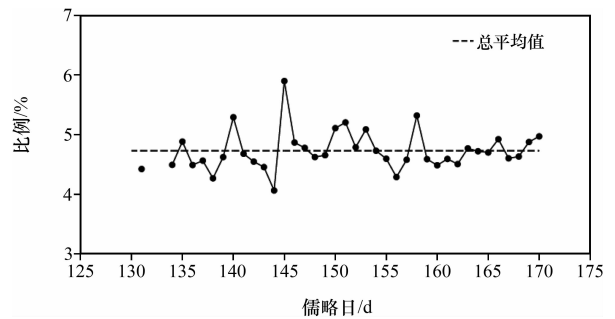


图7 民勤地区紫外辐射占太阳总辐射比例的平均日变化  
Fig. 7 Averaged daily variation of the ratio of total ultraviolet radiation to total solar radiation in Minqin region

表 2 比较了 6 月中国各地区紫外辐射 ( $\overline{UV}$ ) 和总辐射 ( $\overline{G}$ ) 平均日总量及其比值和紫外辐射瞬时最大值情况。由表 2 可知, 2010 年 6 月民勤沙漠地区紫外辐射的平均日总量 ( $1.07 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 比拉萨地区 ( $1.21 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 和临泽地区 ( $1.12 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 小, 与高原其他地区(如五道梁、海北)相当, 而比中国其他地区偏大; 总辐射呈现出类似的变化特征。紫外辐射与太阳辐射比例的平均值为 4.7%, 与高原地区各站点 4.1% ~ 4.6% 相当, 而比其他地区明显偏大。此外, 6 月民勤地区紫外辐射比较强, 瞬时最大值可达  $55.92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 只比拉萨地

表 2 6 月中国各地区紫外辐射 ( $\overline{UV}$ ) 和总辐射 ( $\overline{G}$ ) 平均日总量及其比值和紫外辐射瞬时最大值  
 Table 2 Average monthly of total ultraviolet radiation ( $\overline{UV}$ ), global radiation ( $\overline{G}$ ) and their ratio, and instantaneous maximum of total ultraviolet radiation over different regions in China in June

站点	地理位置	海拔/m	$\overline{UV}$ /(MJ·m <sup>-2</sup> )	$\overline{G}$ /(MJ·m <sup>-2</sup> )	比值/%	$UV_{\max}$ /(W·m <sup>-2</sup> )
五道梁 <sup>[14]</sup>	35°17'N, 93°06'E	4612	1.00	22.16	4.5	55
拉萨 <sup>[10]</sup>	29°40'N, 91°20'E	3668	1.21	26.10	4.6	69
海北 <sup>[20]</sup>	37°37'N, 101°19'E	3230	0.98	23.05	4.3	-
张掖 <sup>[12]</sup>	39°05'N, 100°16'E	1460	0.56	21.01	2.9	-
临泽 <sup>[20]</sup>	39°04'N, 99°35'E	1120	1.12	26.25	-	-
北京森林 <sup>[20]</sup>	40°00'N, 115°26'E	2303	0.76	19.00	4.30	-
北京铁塔 <sup>[20]</sup>	39°09'N, 116°04'E	49	-	-	4.00	32.1
民勤	38°36'N, 102°57'E	1373	1.07	23.07	4.71	55.92
上海 <sup>[32]</sup>	31°14'N, 121°32'E	5.5	0.53	14.55	3.75	43.1

区的  $69 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  小, 与五道梁的  $55 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  相当, 而比其他地区都大很多。一般认为, 紫外辐射强度  $> 30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  就能在短时间内对人体造成相当程度的危害<sup>[32]</sup>。结果表明, 民勤沙漠干旱区不仅具有较强的紫外线, 而且可能会严重损害人体健康。虽然不同作者所使用仪器通道和资料时间段的差异都会影响到辐射通量和比值大小, 但本文给出不同地区的比值还是具有一定的参考价值。

### 3.4 紫外辐射的估算

Foyo - Moreno et al<sup>[33]</sup> 提出利用晴空指数  $Kt$  与最大紫外辐射  $UV_0$  建立地面紫外辐射  $UV$  的估算方案, 估算了 1993 - 1995 年西班牙 Almeria 站地表紫外辐射为  $UV = 2.09 + 1.078 \times (Kt \times UV_0)$ 。胡波

等<sup>[24]</sup> 也利用类似的估算方案建立了北京地区紫外辐射的估算方程  $UV = 0.309 + 1.303 \times (Kt \times UV_0)$ 。由于不同地区气候状况、地理位置和影响的天气系统不同, 将得到不同的拟合系数。本文也采用 Foyo - Moreno 的估算方案<sup>[38]</sup>, 并结合最大紫外辐射的拟合方程和晴空指数估算了民勤沙漠区地面紫外辐射可表示为  $UV = 2.94 + 1.22 \times (Kt \times UV_0)$ , 相关系数达 0.994。与同期观测值的平均相对误差为  $6.67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 标准偏差为  $3.14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (图 8a)。

由前面的讨论可知, 观测期间民勤地区紫外辐射 ( $UV$ ) 和太阳总辐射 ( $G$ ) 呈现非常一致的日变化特征, 两者比例的总平均值为 4.71%。根据这个结

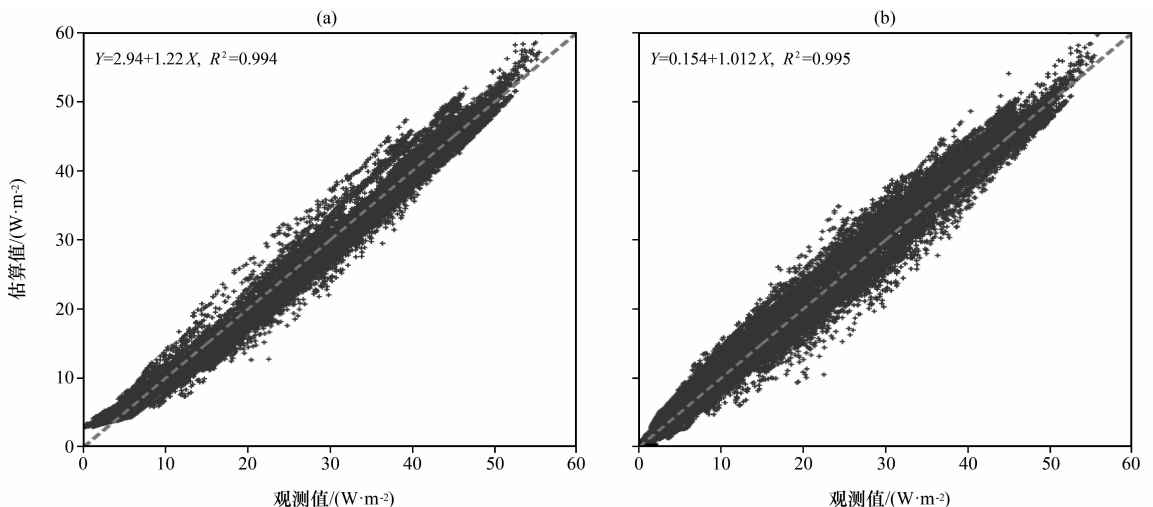


图 8 2010 年 5 - 6 月民勤地区紫外辐射观测与由  $Kt$  指数 (a) 和太阳总辐射 (b) 得到的估算值的散点分布  
 Fig. 8 Scatter plots of the measured and calculated by  $Kt$  index (a) and global radiation (b) ultraviolet radiation in Minqin region from May to June 2010

果,结合太阳总辐射建立了紫外辐射的估算方程  $UV=0.0471G$ 。图 8b 描述了 2010 年 5—6 月紫外辐射估算值 ( $UV_{Cal}$ ) 与观测值 ( $UV_{Obs}$ ) 的散点分布,虚线为 1:1 线。拟合方程可表示为  $UV_{Cal} = 0.154 + 1.012UV_{Obs}$ , 相关系数为 0.995。估算值与同期观测的平均相对误差为  $0.31 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 标准偏差为  $1.61 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 也能较好地估计地面紫外辐射。

### 3.5 辐射传输模式计算

由美国加利福尼亚大学圣巴巴拉分校开发的大气辐射传输模式 SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer), 采用了离散纵坐标方法解辐射传输方程。该模式适合于求解紫外、可见及红外波段的平面平行大气辐射传输问题,它基本上继承了以往辐射传输模式的成果,如它的大气模型、气体吸收等都是 LOWTRAN7 的内容,解辐射传输方程利用了 DISORT 的方法,太阳光谱有 3 种可选择,分别来自 LOWTRAN 7、5S 和 MODTRAN-3S 模式<sup>[34]</sup>。Halothore et al<sup>[35]</sup> 证明了 SBDART 模式模拟的地表辐射精度可达到 3%。本文将气溶胶光学厚度、波长指数、单次散射比、不对称因子、水汽含量、臭氧柱总量和光谱地表反射率作为模式的输入参量,模拟了民勤地区晴空条件下地面紫外辐射(0.295~0.385  $\mu\text{m}$ ) 通量。具体方法请参见文献[26]。

图 9 为 5—6 月民勤地区紫外辐射观测值与 SBDART 计算值的散点分布。从图 9 中可以看出,总的来说,模式低估了紫外辐射,主要是由于模式输入的气溶胶光学参量只有 440, 675, 870 和 1020 nm 4 个通道值,而紫外波段 295~385 nm 的光学参数由这些通道已知的参量进行外推得到,难免会存在一定的误差。另一方面,各种输入参数的不确

定性也将给模拟结果带来误差。此外,吕达仁等<sup>[6]</sup>指出,当前已有的辐射传输模式在估算紫外波段时误差较大,主要是因为气溶胶粒子在紫外波段的散射相函数具有极强的方向性。

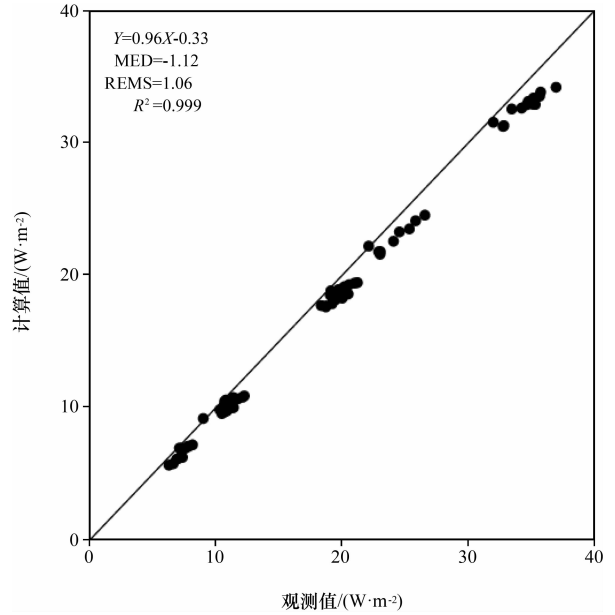


图 9 2010 年 5—6 月民勤地区紫外辐射观测值与 SBDART 计算值的散点分布

Fig. 9 Scatter plots of SBDART simulated and measured total ultraviolet radiation in Minqin region from May to June 2010

图 10 是对应的模式模拟的 69 个例子与地表紫外辐射观测的差异。从图 10 中可以看出,模式低估的总平均值为  $1.12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 变化范围在  $-2.8 \sim 0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 低估了将近 5.6%。由于较难获得精确的输入参数<sup>[26]</sup>, 利用辐射传输模式只能模拟晴空条件下的紫外辐射,而且计算误差较大。根据

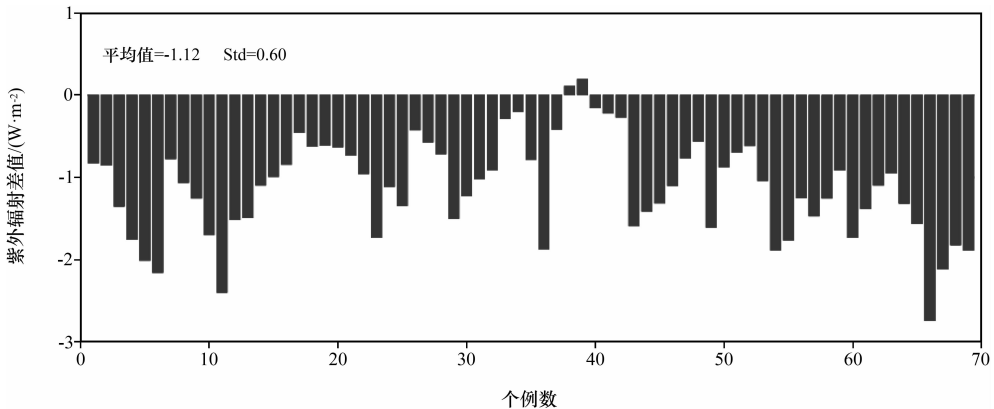


图 10 SBDART 模式模拟的和地面观测的民勤地区总紫外辐射的差值

Fig. 10 Differences between the SBDART simulation and measurements of total ultraviolet radiation for 69 cases in Minqin region



大气光学质量或太阳总辐射可以估算晴空和有云条件下的紫外辐射通量, 其结果明显优于辐射传输模式的计算值, 但不同地区影响的天气系统和气候特征不一样, 故本估算方法将存在不同的结果。

## 4 结论

利用 2010 年春季民勤沙尘暴加强观测试验的地面辐射资料, 分析了民勤沙漠地区紫外辐射的变化特征, 并结合晴空指数和大气光学质量建立了该地区紫外辐射的估算方程。主要结论如下:

(1) 民勤地区太阳总辐射和紫外辐射的日变化很剧烈, 两者表现出非常一致的变化特征。6 月紫外辐射的平均日总量 ( $1.07 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 比拉萨 ( $1.21 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 和临泽 ( $1.12 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 小, 与高原其他地区(如五道梁、海北)相当, 而比中国其他地区的偏大。紫外辐射与太阳辐射比例的平均值为 4.7%, 与高原地区各站点 4.1% ~ 4.6% 的相当, 而比其他地区的明显偏大。

(2) 臭氧柱总量和天气状况能同时影响近地面的紫外辐射, 晴空条件下臭氧的影响更明显, 而多云和阴天天气时, 天气状况的影响相对更大。

(3) 太阳辐射  $< 600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  或晴空指数  $K_t < 0.6$  时, 紫外辐射与总辐射的比值存在较大的离散性分布, 主要集中在 3% ~ 9% 的范围内; 而太阳辐射  $> 600 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  或晴空指数  $K_t > 0.6$  时, 比值随总辐射或晴空指数的增加呈现上升的趋势, 逐渐趋于 4.7%。

(4) 根据晴空指数与最大紫外辐射建立了民勤地区紫外辐射的估算方程为  $UV = 2.94 + 1.22 \times (K_t \times UV_0)$ , 与观测值的平均相对误差为  $6.67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 标准偏差为  $3.14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ; 结合总辐射建立了的估算方程为  $UV = 0.047G$ , 对应的平均误差为  $0.31 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 标准偏差为  $1.61 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 这些均能较好地估计地面紫外辐射。

(5) 由于受到输入参数精度的限制, SB-DART 模式低估了晴空条件下的紫外辐射, 低估的总平均值为  $1.12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 变化范围在  $-2.8 \sim 0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 低估了将近 5.6%。

总之, 由于缺乏观测资料, 本文只分析了 2010 年 5—6 月民勤沙漠地区的紫外辐射变化特征。今后还需要在西北地区甚至整个中国范围内开展不同站点、长时间序列的连续观测, 以期全面了解中国紫外辐射的变化规律和时空分布特征。

**致谢:** 感谢中国气象局提供民勤县气象台站的探空资料、美国 NASA 提供 TOMS 和 AERONET 资料。同时, 感谢民勤治沙站全体员工及兰州大学土木工程与力学院的郑晓静院士和王萍老师对试验的支持与帮助, 在此一并致谢。

## 参考文献:

- [1] Farman J C, Gardiner B G, Shanklin J D. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction [J]. *Nature*, 1985, 315: 207–210.
- [2] Frederick J E. Ultraviolet sunlight reaching the earth's surface: a review of recent research [J]. *Photochem Photobiol*, 1993, 57: 175–1178.
- [3] 周秀骥, 罗超, 李维亮, 等. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心 [J]. *科学通报*. 1995, 40(15): 1396–1398.
- [4] 吴兑, 邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报 [M]. 北京: 气象出版社, 2001.
- [5] 王明星. 大气化学 [M]. 北京: 气象出版社, 1991: 296–301.
- [6] 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 [J]. *大气科学*, 1996, 20(3): 343–351.
- [7] 王普才, 吴北婴, 章文星. 影响地面紫外辐射的因素分析 [J]. *大气科学*, 1999, 23(1): 37–44.
- [8] 白建辉, 王庚辰, 胡非. 太阳紫外辐射在大气中衰减的探讨 [J]. *气候与环境研究*, 2002, 7(4): 440–446.
- [9] Gardiner B G, Webb A R, Bais A F, et al. European intercomparison of ultraviolet spectroradiometers [J]. *Environment Technology*, 1993, 14(1): 25–43.
- [10] 季国良, 陈有虞. 青藏高原的紫外辐射 [J]. *高原气象*, 1985, 4(增刊): 112–121.
- [11] 白建辉, 王庚辰. 北京地区太阳紫外辐射的观测与分析研究 [J]. *大气科学*, 1994, 18(3): 341–347.
- [12] 江灏, 季国良, 吕兰芝. HEIFE 绿洲区的太阳紫外辐射 [J]. *高原气象*, 1994, 13(3): 346–352.
- [13] 张兴华, 胡波, 王跃思, 等. 拉萨紫外辐射特征分析及估算公式的建立 [J]. *大气科学*, 2012, 36(4): 744–754.
- [14] 江灏, 季国良. 五道梁地区的太阳紫外辐射 [J]. *高原气象*, 1996, 15(2): 141–146.
- [15] 江灏, 季国良, 师生波, 等. 藏北高原紫外辐射的变化特征 [J]. *太阳能学报*, 1998, 19(1): 7–12.
- [16] 白建辉, 王庚辰. 北京地区太阳紫外辐射的长期变化趋势及分析 [J]. *太阳能学报*, 2000, 21(2): 192–197.
- [17] 白建辉, 王庚辰. 北京地区太阳紫外辐射的基本特征 [J]. *太阳能学报*, 1993, 14(3): 245–250.
- [18] 白建辉, 王庚辰. 大气中的水汽对太阳紫外辐射消光的可能机制分析研究 [J]. *大气科学*, 1995, 19(3): 380–384.
- [19] 胡波. 中国紫外与光合有效辐射的联网观测及其时空分布特征研究 [D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2005: 33–38.
- [20] Hu B, Wang Y S, Liu G R. Ultraviolet radiation spatial-temporal

- characteristics derived from the ground-based measurements taken in China[J]. *Atmos Environ*, 2007, 41(27): 5707–5718.
- [21] 吉廷艳, 王红丽, 胡跃文, 等. 贵阳地区太阳紫外辐射变化特征及主要影响因素分析[J]. *高原气象*, 2011, 30(4): 1005–1010.
- [22] 王普才, 吴北婴, 章文星. 紫外辐射传输模式计算与实际测量的比较[J]. *大气科学*, 1999, 23(3): 359–364.
- [23] Wang Pucui, Lenoble J. Comparison between measurements and modeling of UV—B irradiance for clear sky: A case study[J]. *Appl Opt*, 1994, 33, 3964–3971.
- [24] 胡波, 王跃思, 刘广仁. 北京城市紫外辐射变化特征及经验估算方程[J]. *高原气象*, 2007, 26(3): 511–518.
- [25] 白建辉, 王庚辰. 广州地区太阳紫外总辐射的统计计算方法[J]. *太阳能学报*, 1998, 19(1): 54–59.
- [26] Bi J, Huang J, Fu Q, et al. Field measurement of clear-sky solar irradiance in Badain Jaran Desert of Northwestern China[J]. *J Quan Spectro Rad Transfer*, 2012, doi:10.1016/j.jqsrt.2012.07.025.
- [27] McCartney E J. *Optics of the Atmosphere*[M]. New York: John Wiley, 1976: 408.
- [28] 张丁玲, 黄建平, 刘玉芝, 等. 利用 CERES(SYN) 资料分析青藏高原高原辐射强迫的时空变化[J]. *高原气象*, 2012, 31(5): 1192–1202.
- [29] Halthore R N, Schwartz S E, Michalsky J J, et al. Comparison of model estimated and measured direct-normal solar irradiance [J]. *J Geophys Res*, 102 (D25), 1997, doi: 10.1029/97JD02628.
- [30] Kasten F, Andrew T Y. Revised optical air mass tables and approximation formula [J]. *Appl Opt*, 1989, 28 (22), 4735–4738.
- [31] 赵庆云, 张武, 吕萍, 等. 河西走廊“2010.04.24”特强沙尘暴特征分析[J]. *高原气象*, 2012, 31(3): 688–696.
- [32] 阴俊, 谈建国. 上海地区地面太阳紫外辐射的观测和分析[J]. *热带气象学报*, 2006, 22(1): 86–90.
- [33] Foyo-Moreno I, Vida J, Alados-Arboledas L. A simple all weather model to estimate Ultraviolet solar radiation (290 ~ 385 nm)[J]. *J Appl Meteor*, 1999, 38: 1020–1026.
- [34] Ricchiazzi P, Yang S, Gautier C, et al. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth’s atmosphere[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 79, 2101–2114, 1998, doi: 10.1175/1520–0477(1998)079<2101: SARATS>2.0.CO;2.
- [35] Halthore R N, David Crisp, Schwartz S E, et al. Intercomparison of shortwave radiative transfer codes and measurements[J]. *J Geophys Res*, 110, D11206, 2005, doi: 10.1029/2004JD005293.

## Observation and Simulation Study of Solar Ultraviolet Radiation Characteristics in Minqin Region

BI Jianrong<sup>1</sup>, HUANG Jianping<sup>1</sup>, GAO Zhongming<sup>1</sup>, SHI Jinsen<sup>1</sup>,  
MA Yuejie<sup>2</sup>, ZHANG Wu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education and College of Atmospheric Sciences of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Ordos City Bureau of Meteorology, Ordos 017000, China)

**Abstract:** The variation characteristics of surface total ultraviolet radiation (*UV*) over desert and arid region in Minqin was analyzed by using the land-surface radiation datum observed at Minqin during the intensive observational experiment in spring of 2010. The results show that: The ultraviolet radiation and global radiation exhibit consistent variation features, and the opaque cloud have much stronger reflected intensity of global and ultraviolet radiations than thin cloud. For the whole period of measurement, the instantaneous maximum of *UV* is  $55.92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , and the overall daily average is  $1.07 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ . The mean ratio of *UV* to global irradiance is 4.7%, ranging from 3% to 9%. Based on the relationship of clearness index (*Kt*) and maximum *UV* ( $UV_0$ ) and global radiation (*G*) measurements, we develop two empirical formulae are  $UV = 2.94 + 1.22 (Kt \times UV_0)$  and  $UV = 0.047G$ , respectively, which can be estimated surface ultraviolet radiation under all-weather condition. Due to influence by the accuracy of input parameters for model, SBDART radiative transfer model generally underestimates the *UV* radiation under clear-sky condition, which can be about  $1.12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  ( $\sim 5.6\%$ ), varying within  $-2.8$  to  $0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

**Key words:** Ultraviolet radiation; Desert and arid region; Clearness index; Radiative transfer model