

# 卫星反演太阳紫外辐射数据产品在东疆黑戈壁区域的适用性验证

赵雪赏<sup>1,3</sup>, 阿吉古丽·沙依提<sup>2</sup>, 买买提艾力·买买提依明<sup>3</sup>, 刘永强<sup>1\*</sup>,  
王 豫<sup>3</sup>, 高佳程<sup>1,3</sup>, 杨 帆<sup>3</sup>, 霍 文<sup>3</sup>, 周成龙<sup>3</sup>

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆气象学会, 乌鲁木齐 830002;  
3. 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所/中国气象局塔克拉玛干沙漠气象野外科学实验基地, 乌鲁木齐 830002)

**摘 要:** 论文利用2017年东疆哈密地区红柳河黑戈壁地面高精度紫外辐射实测数据与美国NASA Langley研究中心大气科学数据中心提供的CERES\_SYN1 deg\_Ed4A产品数据, 对卫星反演的紫外辐射A、B波段(UVA和UVB)数据在该地区的适用性进行了对比验证。结果表明: ①在日尺度上, 该地区地面实测紫外辐射UVA和UVB与卫星反演数据之间的相关系数达0.9以上, 其中在全天空情况下UVA平均偏差为 $1.15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、UVB平均偏差为 $0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 晴天条件下UVA和UVB的平均偏差分别为 $0.93 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ; ②在季节尺度上, 实测和卫星反演UVA和UVB的偏差夏季最大, 分别为 $2.04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 春冬两季次之, 秋季最小; ③红柳河地区在春夏两季受到气溶胶光学厚度(AOD)影响较大, 呈现显著负相关; ④云量越大, 紫外辐射削弱程度越大, 在多云条件下地面实测与卫星反演UVA与UVB偏差最大, 分别为 $1.73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

**关键词:** 紫外辐射; CERES卫星反演资料; 黑戈壁; 红柳河地区

太阳紫外辐射(Ultraviolet Radiation)是200~400 nm波段的太阳辐射, 常分为3类: UVC(200~290 nm)、UVB(290~320 nm)、UVA(320~400 nm)。在大气外界, 太阳紫外辐射仅占太阳总辐射的8.73%<sup>[1]</sup>。近年来, 太阳紫外辐射由于其强烈的生物学效应和化学效应, 在农学、生物学、医疗保健、环境保护、气象学、摄影、印染工业及标准光源的设计等多种领域内受到很大关注<sup>[2-5]</sup>。全球不同区域建设了诸多基于地面的辐射观测站点, 国内外学者利用这些站点对不同区域的紫外辐射进行了研究。早在20世纪80年代, 美国国家科学基金会(NSF)和美国农业部(USDA)建立了极地紫外线监测网络并

投入使用<sup>[6]</sup>; 中国从1993年起在南极中山站分别建立了辐射和臭氧观测系统, 获得了紫外辐射和臭氧的连续观测资料<sup>[7]</sup>。郑有飞等<sup>[8]</sup>于1996年以大豆和小麦为例, 评估作物对太阳紫外线辐射增加的生物效应, 为预测未来气候变化对农作物的影响及制定对策提供科学依据; 刘新罡等<sup>[9]</sup>利用太阳—大气紫外光谱辐射计(SAUVS), 测量到达北京地表的太阳直接和散射紫外光谱辐射; 何清等<sup>[10]</sup>、买买提艾力·买买提依明等<sup>[11]</sup>利用塔克拉玛干区域的紫外辐射实地观测数据, 得出该地区紫外辐射变化规律及其影响因子; 黄梅玲等<sup>[11]</sup>通过对中国区域紫外辐射的时空演变特征分析, 得出中国紫外辐射呈西部高、东

收稿日期: 2020-01-19; 修订日期: 2020-05-19。

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(IDM2017001); 国家自然科学基金项目(41875023, 41675011)。[Foundation: Central Scientific Research Institute of the Public Basic Scientific Research Business Professional, No. IDM2017001; National Natural Science Foundation of China, No. 41875023 and 41675011.]

第一作者简介: 赵雪赏(1995—), 女, 新疆吐鲁番人, 硕士生, 主要从事陆面过程研究。E-mail: Xueshangz@qq.com

\*通信作者简介: 刘永强(1969—), 男, 新疆乌鲁木齐人, 博士, 教授, 研究方向为陆面过程参数化及其模拟。

E-mail: lyqxju@163.com

引用格式: 赵雪赏, 阿吉古丽·沙依提, 买买提艾力·买买提依明, 等. 卫星反演太阳紫外辐射数据产品在东疆黑戈壁区域的适用性验证[J]. 地理科学进展, 2021, 40(2): 304-313. [Zhao Xueshang, Hajigul Sayit, Ali Mamtimin, et al. Assessment of satellite-retrieved solar ultraviolet radiation in the Black Gobi desert of eastern Xinjiang. Progress in Geography, 2021, 40(2): 304-313.]  
DOI: 10.18306/dlkxjz.2021.02.011

部低的总体格局。然而,由于高精度探测网络建设的局限性,无法提供空间连续的紫外辐射观测数据。因此,利用卫星观测来反演地表紫外辐射数据成为新的途径。卫星反演大气层顶部通量的算法也逐渐成熟<sup>[12-16]</sup>。张学海等<sup>[17]</sup>将简化紫外辐射传输模型应用于OMI(Ozone Monitoring Instrument)卫星传感器数据,结合实测数据研究西太平洋地区B波段紫外辐射(UVB),结果显示,简化的紫外辐射传输模型在基于OMI卫星传感器数据反演西太平洋地区的UVB辐射时具有良好的适用性;Su等<sup>[15]</sup>建立了一种从云和地球辐射能系统(CERES)的表面和大气辐射收支(SARB)产品中检索表面UVB和UVA辐照度的算法,初步校正了卫星数据的准确度;庞明珠等<sup>[18]</sup>利用CERES SSF Aqua MODIS Edition 3A数据得到了新疆地区2003—2015年共13 a的地面向下短波辐射时空分布特征;Yan等<sup>[19]</sup>在黄土高原地区利用地面实测数据验证了Terra/Aqua FLASH Flux SSF通量产品的可用性;Jia等<sup>[20]</sup>收集全球地面辐射数据,对CERES净辐射产品的准确性进行了评估,结果表明CERES净辐射产品在全球范围内是高度准确的。

综上可知,国内外学者对基于卫星观测反演的紫外辐射大多集中在城市、农田、高原等地区,对戈壁地区的基于实测和卫星反演的紫外辐射研究未见报道。戈壁作为广布中国西北地区的主要地理单元<sup>[21]</sup>,其面积约66.1万 km<sup>2</sup>,约占中国国土总面积的6.9%<sup>[22]</sup>。红柳河戈壁作为新疆戈壁中较大的区域,对当地天气气候和局地小气候有重要影响。本文利用2017年新疆东部哈密地区黑戈壁下垫面红柳河陆气相互作用站的地面实测紫外辐射数据,和同期的CERES卫星反演紫外辐射数据,进行对比验证,评价卫星资料在该区域的适用性,从而为进一步开展黑戈壁区域太阳紫外辐射规律研究以及太阳能资源开发利用提供参考。

## 1 研究区域、资料与方法

### 1.1 研究区域

本文选择下垫面独特的新疆东部戈壁作为研究区。为了研究戈壁区域的陆气相互作用,中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所在新疆东疆黑戈壁红柳河地区设立了红柳河戈壁陆气相互作用观测站(41°32.013'N, 94°43.820'E, 海拔1579 m)。该站

位于新疆东部哈密地区和甘肃省交界处,该区域下垫面为砾石、砂砾覆盖的戈壁下垫面。土壤发育微弱,石膏化过程和积盐过程突出,表层具有极不稳定的孔状结皮,其下为棕红色紧实层及石膏层,其下的心土层为石膏结晶层,土壤发育为石膏棕色荒漠土。植被覆盖稀疏,盖度不足10%,属于暖性干旱极干旱戈壁区<sup>[23]</sup>。红柳河地区年平均气温为6.1℃,极端最高气温40.6℃,最低气温-35.1℃,多年平均年降水量50.9 mm<sup>[24]</sup>。

### 1.2 资料与方法

#### 1.2.1 地面观测资料

地面实测辐射资料来自红柳河站基准辐射观测系统2017年观测资料,气象资料来自红柳河戈壁陆气相互作用观测站同期的人工观测记录。

红柳河戈壁陆气相互作用观测站由35 m梯度探测系统、涡动相关系统和辐射观测系统组成。地表基准辐射观测系统包括大气短波辐射仪、地面短波辐射仪、大气长波辐射仪、地面长波辐射仪、散射辐射仪、太阳直接辐射仪、太阳自动跟踪器、日照计、双波段紫外辐射仪和光合有效辐射仪,用来获取戈壁区域地表辐射收支变化观测值。其中,双波段紫外辐射仪参数见表1。数据采集器采用美国Campbell公司的CR6系列产品,数据采集频率为1 Hz,采集结果输出为1 s、10 s、1 min、30 min、1 h、1 d不等的时间平均数据和统计数据。

为了分析不同天气情况下的紫外辐射,利用红柳河国家基本气象站人工观测的天气现象记录,对晴天(总云量0~2成)、少云(总云量3~5成)、多云(总云量6~8成)、阴天(总云量9~10成)数据进行分类<sup>[25]</sup>。

表1 红柳河陆气相互作用观测站紫外辐射观测仪器参数

Tab.1 Ultraviolet radiation observation instrument parameter list of Hongliuhe Land-Atmospheric Interaction Observation Station

观测仪器	仪器型号	生产厂家与国家	仪器参数
紫外辐射仪	UVS-AB-T	Kipp & Zonen, 荷兰	波段范围:315~400 nm 输出范围:0~90 W·m <sup>-2</sup> 响应时间:<1.5 s (10%~90%) 非线性:<1% 工作温度:-40~50℃
UVA探头			
紫外辐射仪	UVS-AB-T	Kipp & Zonen, 荷兰	波段范围:280~315 nm 输出范围:0~6 W·m <sup>-2</sup> 响应时间:1.5 s (10%~90%) 非线性:<1% 工作温度:-40~50℃
UVB探头			

### 1.2.2 卫星资料

卫星数据源于美国 NASA Langley 研究中心大气科学数据中心提供的 CERES\_SYN1deg\_Ed4A 每小时产品数据中的全天空状态下的 UV 辐射、云量覆盖度 (cloud area fraction, CAF)、云光学厚度 (COD)、气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 数据 (<http://ceres.larc.nasa.gov/>)。CERES SYN1deg 产品使用 1 h 辐射和对地静止 (GEO) 成像仪的云属性数据,以更准确地对 CERES 观测之间的变化建模。SYN 数据集是把 CERES 中辐射通量和云的单卫星格点化资料 (FSW) 作为绝对参考,对地静止卫星和大气结构数据 (ASTR) 订正,并通过空间插值得到空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  的格点数据,时间分辨率 1 h。为确定云和地面特征,使用 GEO 数据来完成昼夜采样,利用高光谱分辨率和高空间分辨率处理云图像资料,使其具有更高的精确性,进而更有利于研究云的气候、区域变化特征。为更好地估计云辐射效应,CERES 采用宽波段测量仪获得大气层顶的辐射通量资料,引进精确的 CERES 角分布模式,使得 CERES 云特征精确度更高,且误差减小 3~4 倍。

CERES\_SYN1deg\_Ed4A 还提供多种时间分辨率产品,包括月平均、每小时平均和 3 h 平均的直接和散射辐射、紫外线 (UV)、短波 (SW)、长波 (LW) 的通量和反照率产品以及 AOD、COD、臭氧 ( $O_3$ ) 等辅助参数,这些验证产品在 CERES 网站上有详细说明 ([https://ceres.larc.nasa.gov/documents/DQ\\_summaries/CERES\\_SYN1deg\\_Ed4A\\_DQS.pdf](https://ceres.larc.nasa.gov/documents/DQ_summaries/CERES_SYN1deg_Ed4A_DQS.pdf))。

### 1.2.3 数据处理

数据质量控制利用 3 倍标准差方法剔除异常值,日平均数据利用地面实测 0.5 h 紫外辐射数据计算得到,CERES 辐射及辐射影响因子日平均数据 (24 h) 由其 1 h 数据计算得出。根据地面与卫星数据间的相关系数 ( $r$ )、平均偏差 (MB)、均方根误差 (RMSE) 及偏差百分比 (Difference) 可对卫星数据的可靠性进行检验。对地面和卫星数据逐日时间序列进行  $t$  检验。平均偏差越小,地面与卫星数据间的偏差越小;均方根误差表征数据在拟合线上的离散程度,文中通过偏差百分比的频率直方图表示地面与卫星数据间的偏差分布。

为使不同云量条件下的数据与不同云覆盖度下的卫星数据相互匹配,文中使用 CERES 产品中的云量覆盖度 (CAF) 参数对卫星数据产品进行了归

类整理,即将  $CAF < 20$  设定为晴天,  $30 < CAF < 50$  为少云,  $60 < CAF < 80$  为多云,  $CAF > 80$  阴天。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (F_c^i - \overline{F_c})(F_o^i - \overline{F_o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (F_c^i - \overline{F_c})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (F_o^i - \overline{F_o})^2}} \quad (1)$$

$$MB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_o^i - F_c^i) \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_o^i - F_c^i)^2} \quad (3)$$

$$Difference = \frac{F_o^i - F_c^i}{F_o^i} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $F_o$  为地面实测值,  $F_c$  为 CERES 观测值,  $i$  为样本。

## 2 分析与讨论

### 2.1 卫星观测与地面观测紫外辐射的对比

通过日尺度的地面实测数据与全天空状态 CERES 数据的相关性分析 (图 1) 可知,地面实测与卫星反演的 UVA、UVB 相关系数为 0.95 和 0.97,均通过 0.01 的显著性检验。在全天空状态下,地面实测与卫星反演的 UVA、UVB 的均方根误差 RMSE 分别为  $2.43 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $0.06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,平均偏差 MB 分别为  $1.15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在晴天状态下,地面实测与卫星反演 UVA、UVB 的均方根误差 RMSE 分别为  $3.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $0.08 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,平均偏差 MB 分别为  $0.93 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

图 2 显示了全天空和晴天 2 种状态下,日尺度的 UVA 和 UVB 的偏差分布状况,可以看出全天空和晴天状态下的 UVA 和 UVB 偏差多数均在 10% 以内。

对 2017 年四季的卫星反演和地面观测紫外辐射变化情况进行分析 (表 2、图 3、图 4),获得了不同季节条件下的紫外辐射变化。UVA、UVB 的辐射强度均呈现夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季。在春、夏两季,UVA 的地面实测和卫星观测之间的相关系数均超过 0.9,秋、冬两季相对较低,但也超过了 0.7,UVB 的地面实测和卫星观测之间的相关系数四季均高于 0.8,其相关性均通过 0.01 的显著性检验。在冬季,卫星反演紫外辐射数据偏低,是由于太阳高度较低,阳光光程较长,波长较短的紫外辐射因其透射能力较弱而受到较大的削弱,导致卫星观测数据小于地面实测值。

为了分析太阳紫外辐射的年变化,采用 2017 年



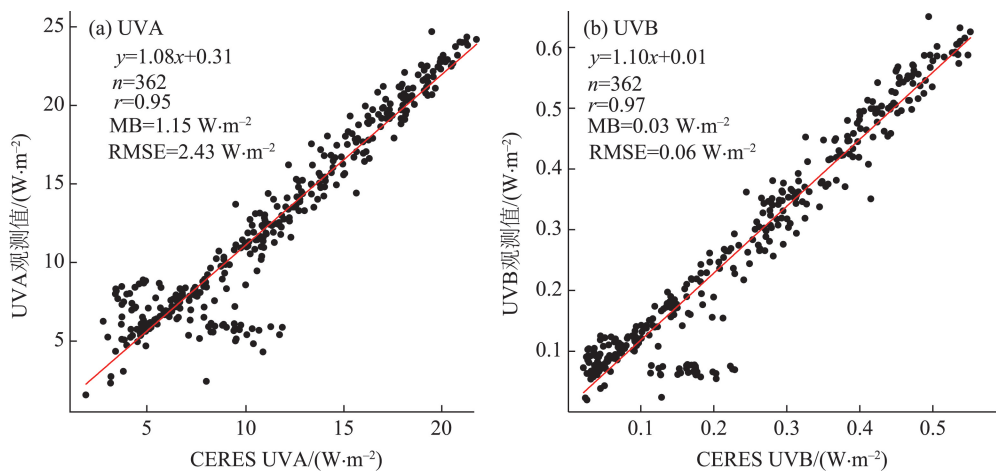


图1 地面实测与卫星反演紫外辐射散点图

Fig.1 Scatter plots of surface observation and satellite-retrieved data of ultraviolet radiation

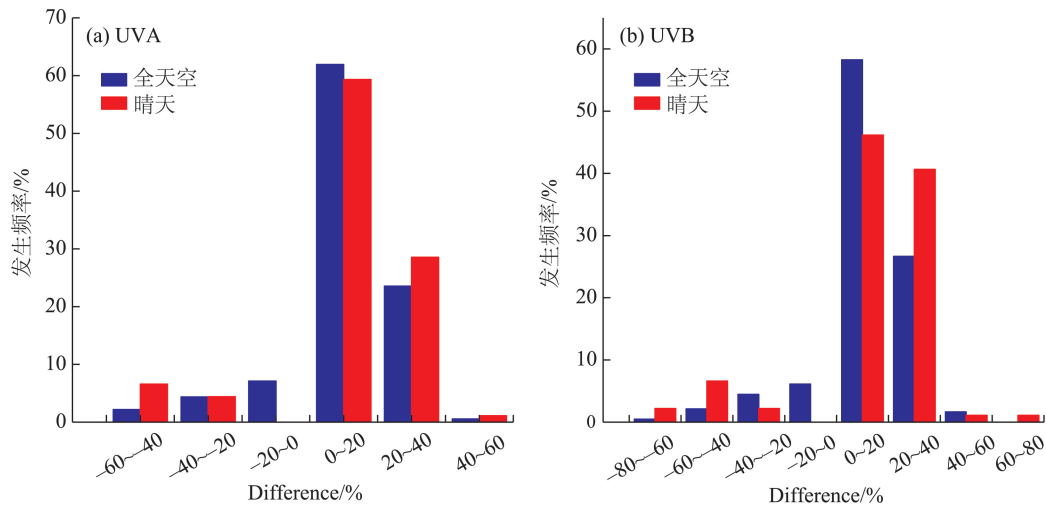


图2 地面实测与卫星反演紫外辐射平均偏差

Fig.2 Daily mean bias histograms of surface observation and satellite-retrieved data of ultraviolet radiation

表2 四季紫外辐射差异统计

Tab.2 Seasonal difference of surface observation and satellite-retrieved data (W·m <sup>-2</sup> )						
季节	UVA			UVB		
	地面实测	CERES	平均偏差	地面实测	CERES	平均偏差
春	15.57	14.16	1.41	0.34	0.29	0.05
夏	17.75	15.71	2.04	0.46	0.41	0.05
秋	8.75	9.35	-0.60	0.16	0.17	-0.01
冬	7.15	5.42	1.73	0.10	0.06	0.04

的UVA和UVB辐射通量日均值进行对比分析(图5),UVA和UVB均呈倒“U”型分布,两者皆受到季节变化的影响,夏季辐射能量最大,冬季最小,地面实测值普遍高于卫星观测值。根据实测数据可知,全年UVA值在5月最大、1月最小,其极大值出现在6月5日、极小值出现在2月6日,分别为70.26 W·m<sup>-2</sup>和4.22 W·m<sup>-2</sup>;UVB在7月最大、12月最小,

其极大值出现在7月16日、极小值出现在2月6日,分别为2.15 W·m<sup>-2</sup>和0.07 W·m<sup>-2</sup>。对于卫星观测数据,全年UVA极大值出现在7月3日、极小值出现在2月6日,分别为62.08 W·m<sup>-2</sup>和8.37 W·m<sup>-2</sup>;UVB的极大值出现在7月24日、极小值出现在1月11日,分别为2.05 W·m<sup>-2</sup>和0.13 W·m<sup>-2</sup>。对比分析地面实测与卫星观测值,UVA与UVB的平均偏差MB

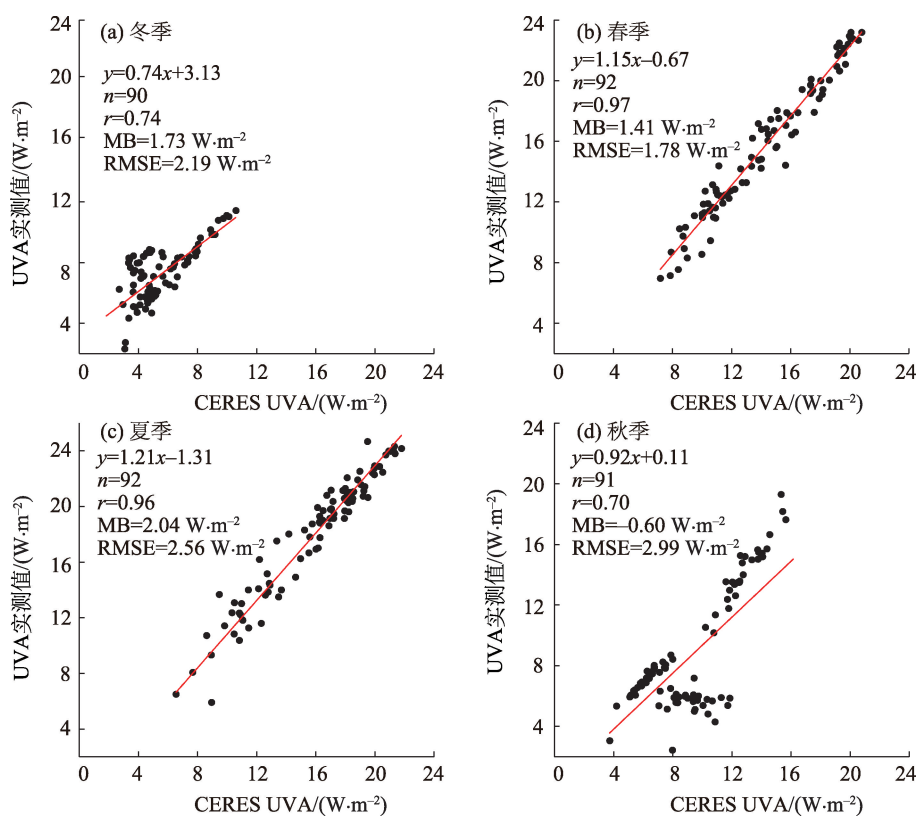


图3 地面实测与卫星反演UVA辐射四季相关性

Fig.3 Scatter plots of seasonal surface observation and satellite-retrieved data of UVA

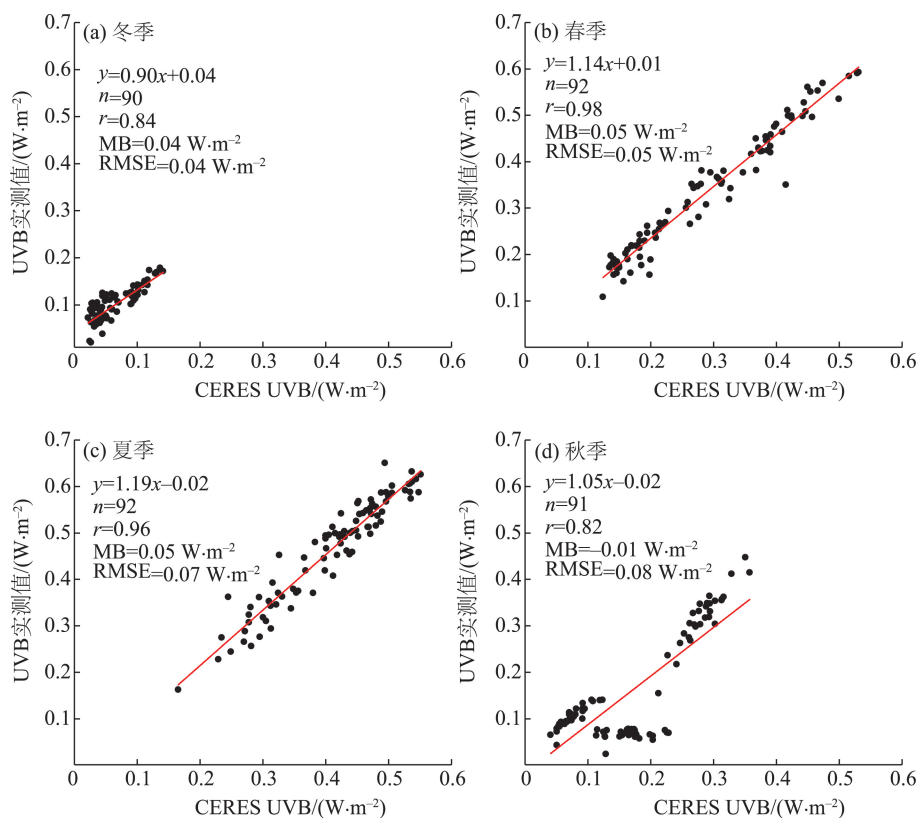


图4 地面实测与卫星反演UVB散点图

Fig.4 Scatter plots of seasonal surface observation and satellite-retrieved data of UVB

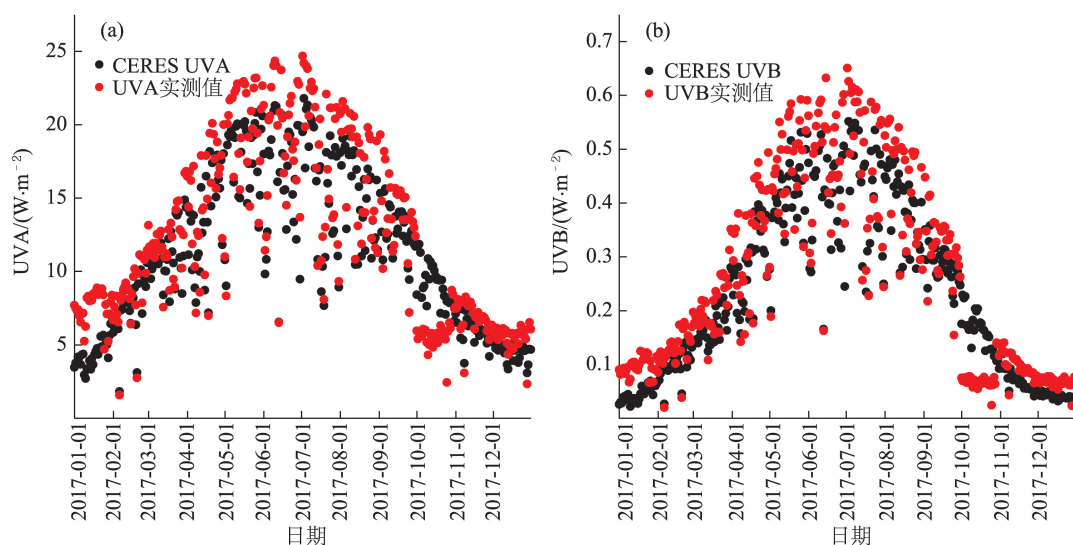


图5 2017年红柳河紫外辐射年变化特征

Fig.5 Annual variation of ultraviolet radiation in Hongliuhe, 2017

分别为  $1.15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

## 2.2 太阳紫外辐射的影响因子

### 2.2.1 AOD对太阳紫外辐射的影响

气溶胶是一个对太阳辐射有重要且复杂影响的因子,它既可以直接反射、散射或吸收太阳辐射,又可以通过改变云的微物理性质而产生间接效应,同时不同气溶胶之间对太阳辐射的影响也有很大的差异,气溶胶的增加(减少)通常还会使到达地面的太阳辐射减少(增加)<sup>[26]</sup>。本文对2017年A、B波段紫外辐射通量与550 nm波段的AOD做相关性分析。为避免云量过大时,对分析AOD与UV关系的干扰,文中将COD划分为4个值域,并选择低于前25%的天气进行分析<sup>[27]</sup>。结果如图6、图7所示,通过对研究区四季紫外辐射与AOD进行相关性分析可知,该地区春夏两季紫外辐射受AOD影响较大,在 $\alpha=0.01$ 的水平上呈显著负相关。这个结果与 Fountoulakis 等<sup>[28]</sup>2016年研究希腊的紫外辐射与AOD呈现负相关类似。

在AOD高值区( $\text{AOD} > 0.4$ ),地面实测与CERES数据UVA、UVB的均方根误差RMSE分别为  $2.37 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $0.06 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,平均偏差MB分别为  $1.17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;在AOD低值区( $\text{AOD} < 0.1$ ),地面实测与CERES数据UVA、UVB的均方根误差RMSE分别为  $2.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $0.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,平均偏差MB分别为  $0.92 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

### 2.2.2 云量对太阳紫外辐射的影响

云的变化也会对紫外辐射产生影响,太阳紫外

辐射光谱强度衰减依赖于波长,且随波长的减小而减小。此外,云量越大,光谱强度衰减也越强<sup>[29]</sup>。本文中利用卫星数据中云量覆盖度(Cloud Area Fraction, CAF)研究红柳河观测地区云量对紫外辐射的影响。计算得出少云天气与晴天的UVA、UVB比例分别为90.28%和89.46%,地面实测与CERES数据UVA、UVB的偏差最小,分别为  $0.47 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $0.02 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。多云天气与晴天的UVA、UVB比例分别为79.93%和83.83%,地面实测与CERES数据UVA、UVB的偏差最大,分别为  $1.73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $0.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。阴天与晴天的UVA、UVB比例分别为69.16%和75.40%,少云天气UVA、UVB分别比晴天减少9.72%、10.54%,多云天气下分别减少20.07%和16.17%,阴天情况下分别减少30.84%和24.60%。总体而言,较之少云状态下,UVA、UVB在阴天状态下衰减率分别增加21.12%和14.06%(表3)。可见紫外辐射随着云量增多而减少,相比于塔克拉玛干沙漠腹地,红柳河地区紫外辐射的衰减较轻,这是因为沙漠腹地沙尘影响,导致云中气溶胶浓度增大,从而导致紫外辐射的衰减程度更大<sup>[25]</sup>。

## 3 结论

本文利用东疆黑戈壁地面实测太阳紫外辐射和卫星反演的CERES紫外辐射产品对比验证后得出以下结论:

(1) 在日尺度上,东疆黑戈壁CERES卫星数据

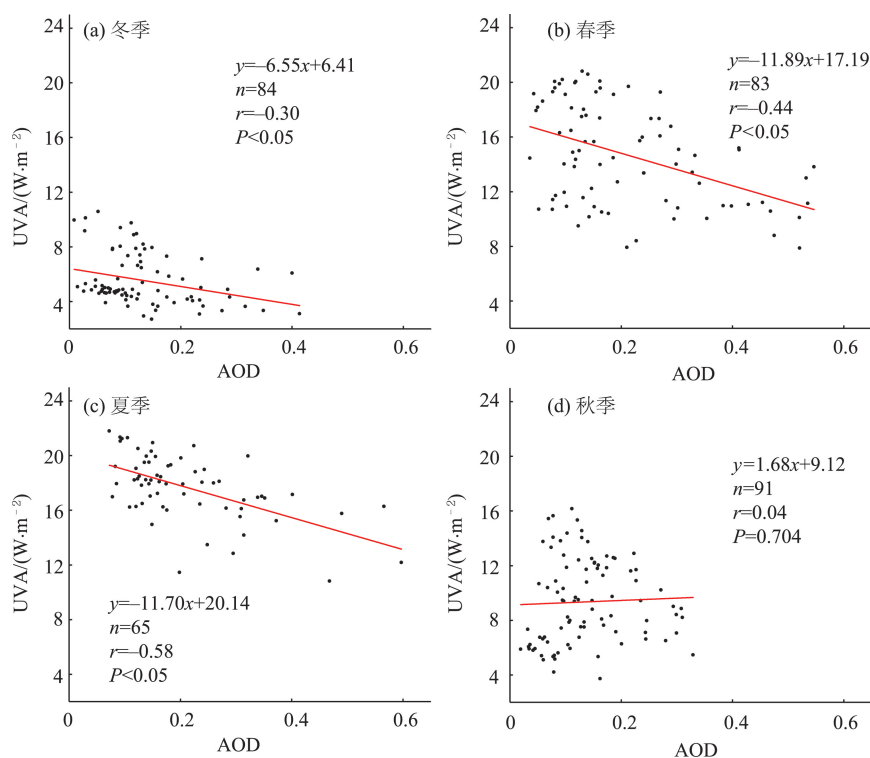


图6 卫星反演UVA与AOD散点图

Fig.6 Scatter plots of satellite-retrieved data of UVA and AOD

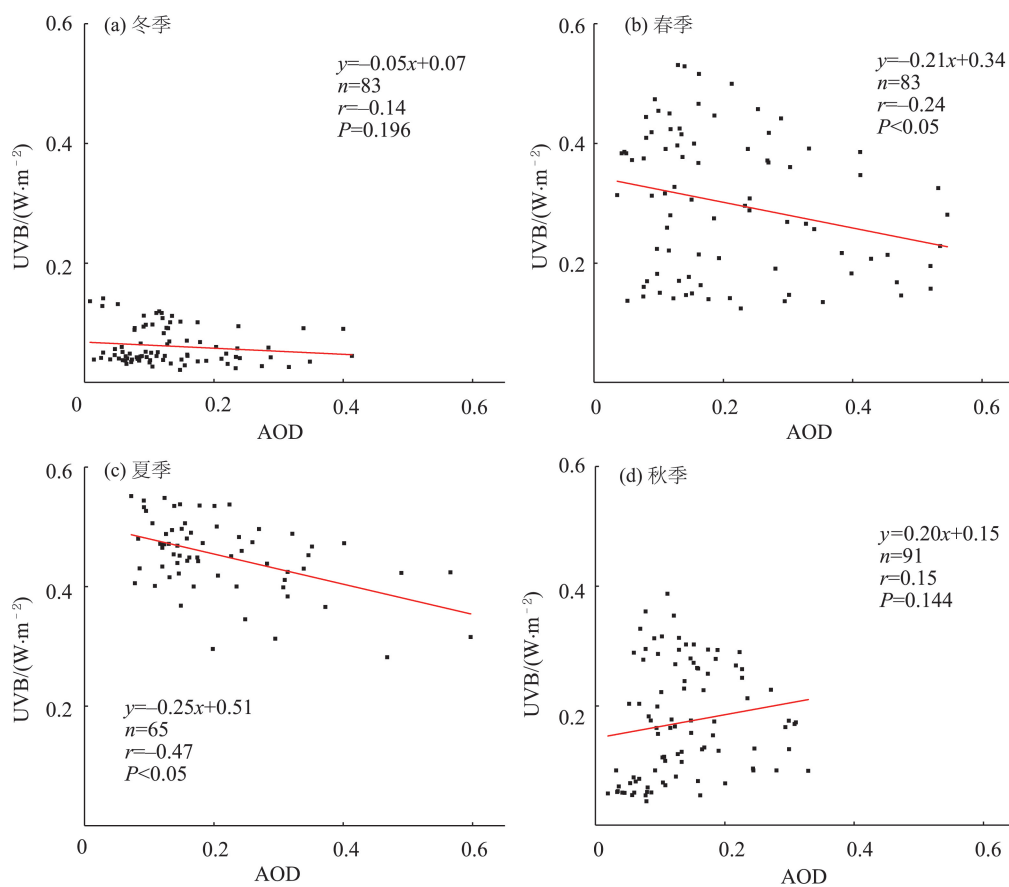


图7 卫星反演UVB与AOD散点图

Fig.7 Scatter plots of satellite-retrieved data of UVB and AOD

表3 云天紫外辐射与晴天紫外辐射比例及偏差

Tab.3 Proportion and mean bias of ultraviolet radiation between cloudy and clear sky

指标	季节	少云		多云		阴天	
		UVA	UVB	UVA	UVB	UVA	UVB
比例/%	春	84.57	80.87	68.98	66.05	64.22	68.26
	夏	97.17	98.23	88.83	92.15	67.55	67.55
	秋	87.07	82.19	79.70	79.70	73.96	70.87
	冬	92.29	96.56	82.20	95.62	70.89	94.92
	平均	90.28	89.46	79.93	83.38	69.16	75.40
平均偏差/(W·m <sup>-2</sup> )		0.47	0.02	1.73	0.05	0.81	0.02

反演紫外辐射产品总体上微低于地面实测数据,全天空状态下UVA与UVB的平均偏差分别为1.12 W·m<sup>-2</sup>、0.03 W·m<sup>-2</sup>;晴天条件下,平均偏差分别为0.93 W·m<sup>-2</sup>和0.03 W·m<sup>-2</sup>。

(2) 该地紫外辐射日均年变化呈倒“U”型分布,辐射通量年变化总分布为夏季>春季>秋季>冬季。UVA和UVB的地面实测与卫星反演相关系数,分别为0.95和0.97;就季节而言,UVA在春、夏两季均高于0.9,秋冬两季较低,但也在0.7以上,而UVB在四季均高于0.8。

(3) 红柳河地区春夏两季紫外辐射受AOD影响较大,在 $\alpha=0.01$ 的水平上呈显著负相关。当AOD>0.4时,实测资料与卫星反演数据之间的偏差较大。

(4) 紫外辐射能量随着云量的增加(减少)而减少(增加),对于UVA,阴天状态比之少云状态下多衰减21.12%;对于UVB,阴天状态比之少云状态下多衰减14.06%,同等云量下紫外辐射在戈壁下垫面比沙漠下垫面衰减程度小。少云天气下地面实测与卫星反演数据UVA、UVB的偏差最小,分别为0.47 W·m<sup>-2</sup>和0.02 W·m<sup>-2</sup>。

参考文献(References)

[1] Al-Aruri S, Rasas M, Al-Jamal K, et al. An assessment of global ultraviolet solar radiation in the range (0.290–0.385 μm) in Kuwait [J]. Solar Energy, 1988, 41(2): 159-162.

[2] 周允华. 中国地区的太阳紫外辐射 [J]. 地理学报, 1986, 41(2): 132-146. [Zhou Yunhua. Ultraviolet solar radiation in China. Acta Geographica Sinica, 1986, 41(2): 132-146.]

[3] Mao B, Zhao L, Zhao Q, et al. Effects of ultraviolet (UV) radiation and litter layer thickness on litter decomposition of two tree species in a semi-arid site of Northeast China

[J]. Journal of Arid Land, 2018, 10(3): 416-428.

[4] 苏延桂, 李新荣, 赵昕, 等. 紫外辐射增强对不同发育阶段荒漠藻结皮光合作用的影响 [J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 889-893. [Su Yangui, Li Xinrong, Zhao Xin, et al. Effects of enhanced UV-B on the photosynthesis of algal crusts. Journal of Desert Research, 2011, 31(4): 889-893.]

[5] 买买提艾力·买买提依明, 缪启龙, 王延慧, 等. 塔克拉玛干沙漠北缘过渡带紫外辐射和总辐射特征 [J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1816-1823. [Mamtali Mamtimin, Miao Qilong, Wang Yanhui, et al. Characteristics of global radiation and ultraviolet radiation over desert-oasis transition zone of the north Taklimakan Desert. Journal of Desert Research, 2013, 33(6): 1816-1823.]

[6] Booth G E, Lucas T B, Mestechkina T, et al. NSF polar programs UV spectroradiometer network 1993–1994 operating report [R]. San Diego, USA: Biospherical Instruments Inc., 1995: 203.

[7] 卞林根, 陆龙骅, 贾朋群. 南极中山站紫外辐射的初步研究 [J]. 科学通报, 1996, 41(9): 805-807. [Bian Linggen, Lu Longhua, Jia Pengqun. A preliminary study of ultraviolet radiation at antarctic Zhongshan Station. Chinese Science Bulletin, 1996, 41(9): 805-807.]

[8] 郑有飞, 杨志敏, 颜景义, 等. 作物对太阳紫外线辐射增加的生物效应及其评估 [J]. 应用生态学报, 1996, 7(1): 107-109. [Zheng Youfei, Yang Zhimin, Yan Jingyi, et al. Biological response of crops on enhanced solar ultraviolet radiation and its estimation. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(1): 107-109.]

[9] 刘新罡, 吕达仁, 肖稳安, 等. 北京晴天紫外波段气溶胶光学厚度反演与分析 [J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(1): 51-57. [Liu Xingang, Lv Daren, Xiao Wen'an, et al. Retrieval and analysis of the aerosol optical depth of Beijing ultraviolet waveband (spectrum) in sunny day. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2005, 28(1): 51-57.]

[10] 何清, 金莉莉, 艾力·买买提明, 等. 塔克拉玛干沙漠腹



- 地太阳紫外 UV-B 辐射的观测与分析 [J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 640-647. [He Qing, Jin Lili, Ali Mamtimin, et al. Observation and analysis of solar UV-B radiation over the Taklimakan Desert hinterland. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(3): 640-647. ]
- [11] 黄梅玲, 江洪, 朱求安, 等. 1961—2000 年中国生态区紫外辐射的时空演变特征 [J]. 地理科学, 2009, 29(3): 391-396. [Huang Meiling, Jiang Hong, Zhu Qiu'an, et al. Spatial and temporal variability characteristics of ultraviolet radiation in eco-regions of China from 1961 to 2000. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(3): 391-396. ]
- [12] Eck T F, Bhartia P K, Kerr J B. Satellite estimation of spectral UVB irradiance using TOMS derived total ozone and UV reflectivity [J]. *Geophysical Research Letters*, 1995, 22(5): 611-614.
- [13] Herman J R, Bhartia P K, Ziemke J, et al. UV-B increases (1979–1992) from decreases in total ozone [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(16): 2117-2120.
- [14] Krotkov N A, Bhartia P K, Herman J R, et al. Satellite estimation of spectral surface UV irradiance in the presence of tropospheric aerosols: 1. Cloud-free case [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, 103 (D8): 8779-8793.
- [15] Su W Y, Charlock T P, Rose F G. Deriving surface ultraviolet radiation from CERES surface and atmospheric radiation budget: Methodology [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, 110(D14). doi: 10.1029/2005jd005794.
- [16] Arola A, Kazadzis S, Krotkov N, et al. Assessment of TOMS UV bias due to absorbing aerosols [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110(D23). doi: 10.1029/2005JD005913.
- [17] 张学海, 张亭禄, 陈树果. 简化紫外辐射模型在基于 OMI 卫星传感器数据反演西太平洋海面紫外辐射中的应用 [J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(1): 163-169. [Zhang Xuehai, Zhang Tinglu, Chen Shuguo. Mapping the UV radiation in the western Pacific Ocean with the simplified UV radiation model from OMI satellite sensor data. *Remote Sensing Technology and Application*, 2015, 30(1): 163-169. ]
- [18] 庞明珠, 周黛怡, 陈勇航, 等. 基于 CERES/Aqua 卫星资料的新疆地面向下短波辐射时空分布特征 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2017, 11(5): 9-15. [Pang Mingzhu, Zhou Daiyi, Chen Yonghang, et al. Spatial and temporal distribution of downward surface shortwave in Xinjiang based on CERES/Aqua data. *Desert and Oasis Meteorology*, 2017, 11(5): 9-15. ]
- [19] Yan H R, Huang J P, Minnis P, et al. Comparison of CERES surface radiation fluxes with surface observations over Loess Plateau [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(6): 1489-1500.
- [20] Jia A L, Jiang B, Liang S L, et al. Validation and spatio-temporal analysis of CERES surface net radiation product [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(2): 90-109. doi: 10.3390/rs8020090.
- [21] 胡月宏, 艾力·买买提明, 宗飞, 等. 新疆戈壁地区近地面大气折射率结构常数观测对比 [J]. 中国沙漠, 2017, 37(6): 1237-1239. [Hu Yuehong, Ali Mamtimin, Zong Fei, et al. Test of atmospheric refractive index structure constant near ground in gobi region of Xinjiang, China. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(6): 1237-1239. ]
- [22] 冯益明, 吴波, 姚爱冬, 等. 戈壁分类体系与编目研究 [J]. 地理学报, 2014, 69(3): 391-398. [Feng Yiming, Wu Bo, Yao Aidong, et al. A study on classification system and inventory of Gobi. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(3): 391-398. ]
- [23] 朱德琴, 高晓清, 陈文. 陆面模式(SSiB)对敦煌荒漠戈壁下垫面陆面过程的模拟及敏感性试验 [J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 466-472. [Zhu Deqin, Gao Xiaoqing, Chen Wen. Validation of SSiB model over Gobi in Dunhuang and its sensitivity to vegetation parameters. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(3): 466-472. ]
- [24] 李如琦. 红柳河气温与降水气候特征分析 [J]. 农技服务, 2009, 26(12): 107-108, 141. [Li Ruqi. Climatic characteristics of temperature and precipitation in Hongliuhe. *Serves of Agricultural Technology*, 2009, 26(12): 107-108, 141. ]
- [25] 何清, 金莉莉, 杨兴华. 沙漠腹地紫外辐射特征及影响因素分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5(5): 7-14. [He Qing, Jin Lili, Yang Xinghua. Solar ultraviolet radiation characteristics and influencing factors of desert hinterland. *Desert and Oasis Meteorology*, 2011, 5(5): 7-14. ]
- [26] 申彦波, 赵宗慈, 石广玉. 地面太阳辐射的变化、影响因素及其可能的气候效应最新研究进展 [J]. 地球科学进展, 2008, 23(9): 915-923. [Shen Yanbo, Zhao Zongci, Shi Guangyu. The progress in variation of surface solar radiation, factors and probable climatic effects. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(9): 915-923. ]
- [27] Singh S, Lodhi N K, Mishra A K, et al. Assessment of satellite-retrieved surface UVA and UVB radiation by comparison with ground-measurements and trends over mega-city Delhi [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 188: 60-70.
- [28] Fountoulakis I, Bais A F, Fragkos K, et al. Short- and long-term variability of spectral solar UV irradiance at Thessaloniki, Greece: Effects of changes in aerosols, to-

- tal ozone and clouds [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(4): 2493-2505.
- [29] 赵晓艳, 闫海涛, 甄志强, 等. 云影响太阳紫外辐射光谱的研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(1): 55-57.
- [Zhao Xiaoyan, Yan Haitao, Zhen Zhiqiang, et al. Research on clouds affecting the spectra of solar ultraviolet radiation. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(1): 55-57.]

## Assessment of satellite-retrieved solar ultraviolet radiation in the Black Gobi desert of eastern Xinjiang

ZHAO Xueshang<sup>1,3</sup>, Hajigul Sayit<sup>2</sup>, Ali Mamtimin<sup>3</sup>, LIU Yongqiang<sup>1\*</sup>, WANG Yu<sup>3</sup>,  
GAO Jiacheng<sup>1,3</sup>, YANG Fan<sup>3</sup>, HUO Wen<sup>3</sup>, ZHOU Chenglong<sup>3</sup>

(1. College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;  
2. Xinjiang Meteorological Society, Urumqi 830002, China; 3. Desert Meteorology Field Experiment  
Station of CMA, Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China)

**Abstract:** In this study, we compared the 2017 ground-based surface ultraviolet radiation in the UVA and the UVB bands of the Hongliuhe Black Gobi desert in Hami region of eastern Xinjiang Autonomous Region with the CERES\_SYN1 deg\_Ed4A product data provided by the NASA Langley Research Center Atmospheric Science Data Center. The results show that: 1) On a daily scale, the coefficient of correlation between the ground-based and the satellite-retrieved UVA and UVB fluxes is above 0.9. The daily mean bias of the ground-based observed data and the satellite-retrieved UVA and UVB fluxes are  $1.15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  and  $0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  under all-sky conditions, and  $0.93 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  and  $0.03 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  under clear sky. 2) Seasonally, the difference of UVA and UVB observed and retrieved by satellite is the largest in the summer, at  $2.04 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  and  $0.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  respectively, followed by the spring and the winter, and is the smallest in the autumn. 3) The Hongliuhe area was greatly affected by aerosol optical depth (AOD) in the spring and the summer, showing a significant negative correlation. 4) The degree of ultraviolet radiation attenuation increases with the cloud cover. Under cloudy conditions, the mean bias of ground measurements and satellite-retrieved data of UVA and UVB are the largest, at  $1.73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  and  $0.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  respectively.

**Keywords:** Ultraviolet radiation; CERES data product; Black Gobi desert; Hongliuhe area