

张兴华, 胡波, 王跃思, 等. 2012. 拉萨紫外辐射特征分析及估算公式的建立 [J]. 大气科学, 36 (4): 744–754, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11165.
Zhang Xinghua, Hu Bo, Wang Yuesi, et al. 2012. The analysis of variation characteristics and establishing of estimating equation for ultraviolet radiation in Lhasa [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (4): 744–754.

拉萨紫外辐射特征分析及估算公式的建立

张兴华^{1,2} 胡波² 王跃思^{1,2} 张武¹ 何永涛³ 孙维³

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 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

3 中国科学院地理科学与资源研究所拉萨农业生态试验站, 北京 100101

摘 要 本文利用 2005~2010 年的辐射观测资料对拉萨地区紫外辐射的时间变化特征及紫外辐射与总辐射比值的
变化特征进行了分析, 结果表明, 紫外辐射与太阳总辐射的变化规律基本一致, 日变化表现为正午大、早晚小;
季变化特征是夏季 6 月最大, 冬季 1 月最小。紫外辐射日累积值 6 年平均为 $0.87 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; 紫外辐射有逐年递
减的趋势。紫外辐射与总辐射比值也存在着明显日变化, 表现为正午大、早晚小的规律; 其季节变化也是夏季最
大, 冬季最小。紫外辐射与总辐射比值 6 年平均为 0.0418; 紫外辐射与总辐射比值也呈现逐年递减的趋势。利用
2010 年大气质量数和晴空指数, 建立了适合于拉萨紫外辐射估量的公式, 估算值的瞬时值与观测值的平均相对误
差最大为 8.66%, 紫外辐射日累积重构造值与观测值平均相对误差仅为 5.5%。

关键词 紫外辐射 比值 拉萨 估算公式

文章编号 1006-9895(2012)04-0744-11

中图分类号 P422

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11165

The Analysis of Variation Characteristics and Establishing of Estimating Equation for Ultraviolet Radiation in Lhasa

Zhang Xinghua^{1,2}, Hu Bo², Wang Yuesi^{1,2}, Zhang Wu¹, He Yongtao³, and Sun Wei³

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

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

3 Lhasa Plateau Ecological Research Station, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

Abstract The temporal variation of ultraviolet (UV) radiation and the ratio of UV radiation to broadband solar radiation were analyzed in Lhasa using the radiation observations during 2005–2010, the results indicate that the UV radiation has consistent variation characteristics with the solar radiation. The highest value of daily UV radiation was measured at noon while the lowest value occurred in the morning or night, the highest value of monthly UV radiation was measured in June while the lowest value occurred in January. The annual mean daily UV radiation was $0.87 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ during this period, with a decreased trend. The ratio of UV radiation to solar radiation has obvious diurnal variation characteristics, namely, the highest value appeared at noon while the lowest value occurred in the morning or night, the seasonal highest value occurred in summer while the lowest value occurred in winter. The mean ratio of UV radiation to solar radiation was 0.0418, which also has a decreased trend in the six years. Finally, an experimental estimating equation was established by

收稿日期 2011-09-15, 2012-02-15 收修定稿

资助项目 中国科学院重要方向项目 KZCX2-YW-433-04

作者简介 张兴华, 男, 1988 年出生, 硕士研究生, 研究方向为大气辐射和遥感。E-mail: zhangxhua06.ok@163.com

通讯作者 胡波, E-mail: hb@dq.cern.ac.cn

using the optical air mass and the clearness index in 2010. This model can estimate UV radiation with high accuracy at the site where the model was developed. The mean bias error was close to zero, and the relative errors were less than 8.66% and 5.5% for instantaneous and daily UV radiation, respectively.

Key words ultraviolet radiation, ratio, Lhasa, estimating equation

1 引言

臭氧是大气中主要的微量成分之一，不仅可以吸收太阳紫外辐射而成为地球上生命的天然保护屏障，而且也是平流层的主要热源，对全球气候变化有着重要作用（王咏梅等，2009）。然而，近年来在两极地区持续观测到平流层臭氧空洞，北半球中纬度地区的臭氧总量也呈现持续减少的趋势，尤其是在青藏高原上空出现了比同纬度明显偏低的臭氧低值区（刘晶淼等，2003；贾龙等，2006；王维和等，2010；肖钟湧和江洪，2010）。大气中臭氧总量的减少，导致的直接结果是到达地面的太阳紫外辐射不断加强（Farman et al., 1985；祝青林等，2005）。

紫外辐射虽然在太阳辐射能量中所占的比例很小，但由于它不仅能对人类健康产生影响，还具有强烈的环境、生物和气候效应，已经成为当前人们关注和研究的焦点之一（胡波等，2007）。医学证明，紫外辐射对人类健康的影响有利也有弊，适量的紫外辐射有助于人体中维生素 D 的合成，有助于防治佝偻病和骨质疏松，紫外辐射也具有一定的杀菌作用。然而，过量的紫外辐射会导致人体的免疫功能出现异常，出现诸如皮肤红斑、眼疾，甚至皮肤癌、白内障等疾病。紫外辐射还可以通过破坏蛋白质中的化学键来损坏生物个体细胞，通过破坏植物叶片来抑制光合作用，从而对整个生态系统产生影响。另外，平流层臭氧的减少会导致对流层紫外辐射上升，这将加快近地面层光化学反应的发生，产生更多的二次污染物，使得近地面空气质量恶化，对人类健康和生活环境产生直接影响（Diffey, 1991）。

青藏高原是世界上平均海拔最高的高原，由于其海拔高度高、空气稀薄、含氧量少、大气透明度高和太阳辐射强的气候特点，有“世界屋脊”和“地球第三极”之称。由于其特殊的地理位置和特有的生态环境，作为大气中的热源，它的动力和热力作用不仅对我国的天气气候产生影响，甚至对东亚乃至全球的大气环流、气候变化都有至关重要的作用（Hu et al., 2008）。另外，我国科学家通过研究发现，在 2003 年 12 月 14 日至 17 日，青藏高原上

空出现大面积臭氧总量的极低值区，其臭氧总量低于 220 DU 的面积超过了 250 万平方公里，中心极低值比历史同期的平均值减少了 25%（卞建春等，2006）。臭氧总量的减少导致到达青藏高原地表的太阳紫外辐射有很大程度的增大，已经对西藏等地人类健康和生活环境产生了有害影响，比如当地白内障发病率的上升、动植物变异和冰川消融加剧等一系列问题（熊效振和王庚辰，1993；周秀骥等，1995；王普才等，1999）。因此，研究青藏高原太阳辐射，尤其是紫外辐射的变化特征已显得尤为重要。

本文的目的是通过分析拉萨 2005~2010 年共 6 年的紫外辐射变化特征，建立适合拉萨的紫外辐射估算公式，从而为拉萨历史紫外辐射的重构、紫外辐射气候学特征的研究提供基本依据。

2 站点和数据介绍

2.1 站点介绍

拉萨站的地理位置为 (29°40'40"N, 91°20'37"E)，海拔高度 3688 m，地处青藏高原拉萨河谷，距离拉萨市大约 60 km，是世界上海拔最高的生态试验站点之一。拉萨属于典型的温带高原季风半干旱气候，冬无严寒，夏无酷暑，年平均气温 7.7℃，常用“一年无四季、一日见四季”的谚语来形容拉萨气温年变化小而日变化大的气候特色。年降雨量 500 mm 左右，干湿季明显，降雨量集中在 7~9 月份，多为昼晴夜雨的天气。辐射强、日照时间长，全年日照时间在 3000 小时以上，素有“日光城”之称。

2.2 仪器介绍

拉萨站气象要素的观测使用芬兰 Milos520 自动气象站，其中辐射观测仪器使用荷兰 Kipp & zionne 生产的辐射表，辐射表的具体参数见表 1。各气象要素和辐射观测数据采用 DM520 数据采集器，采集频率为每分钟采集一次。

表 1 辐射表参数

Table 1 The parameters for pyranometers

辐射类型	表型	准确度
总辐射 (0.3~3 μm)	CM21	±3%
紫外辐射 (0.29~0.4 μm)	CUV3	±5%

总辐射表每年在春季采用“交替法”进行标定, 标定精度为 $\pm 3\%$ 。紫外辐射表采用辐射标准灯和紫外—可见光光谱仪进行标定, 标定精度为 $\pm 5\%$ 。

2.3 数据质量控制

为了保证使用的观测数据具有很高的精度和有效性, 本文采用如下的极值控制方案进行太阳总辐射和紫外辐射的时间质量控制。

(1) 所有观测得到的日(小时)太阳总辐射累计值均应小于同一地理位置大气层顶的辐射总量; 所有观测得到的日(小时)紫外辐射瞬时(累计)值均应小于同一地理位置大气层顶的紫外辐射量。大气层顶的总辐射和紫外辐射量采用 Foyo-Moreno et al. (1999) 提出的计算方案计算。对总辐射和紫外辐射不满足此判别标准的数据, 可直接将其剔除(Geger et al., 2002)。

(2) 地基观测得到的日(小时)太阳总辐射累计值可以稍微大于同一地理位置大气具有很大透过率和非常晴朗天空状态下的日(小时)太阳总辐射累计值; 地基观测得到的日(小时)紫外辐射瞬时值可以稍微大于同一地理位置大气具有很大透过率和非常晴朗天空状态下的紫外辐射瞬时值。非常晴朗天空状态下的日(小时)总辐射和紫外辐射值采用 Rigollier (2000) 提出的方案计算。

(3) 所有夜间观测的日(小时)太阳总辐射累计值应该小于零或者由于仪器零点漂移造成不大于 $\pm 5 \text{ W/m}^2$ 的瞬时输出值, 处理时全部用零值来代替。

(4) 白天总辐射观测数据的极小值应该大于连续阴天时总辐射的观测结果, 即白天的平均无云指数(地基总辐射与大气层顶总辐射的比值)应该大于 0.03。

(5) 为了避免由于仪器的测量问题导致的太阳高度角余弦偏差较大, 只对太阳高度角大于 10° 的辐射数据才进行处理(Huang et al., 2011)。

根据以上方案, 对拉萨 2005~2010 年的瞬时辐射数据进行了质量控制, 对其中不合格数据采取直接删除, 删除数据站总数据的 6.5%。

3 紫外辐射时间变化特征

为了分析拉萨到达地面的紫外辐射的变化规律及其与太阳总辐射和其他影响因子的相互关系, 选取了拉萨站 2005~2010 年共 6 年的辐射观测数据进行了分析, 其中由于缺测或者数据质量控制导致个别天的数据缺失。

图 1 给出了 6 年太阳总辐射和紫外辐射量日累积值的逐日变化, 从图中可以看出, 尽管由于影响

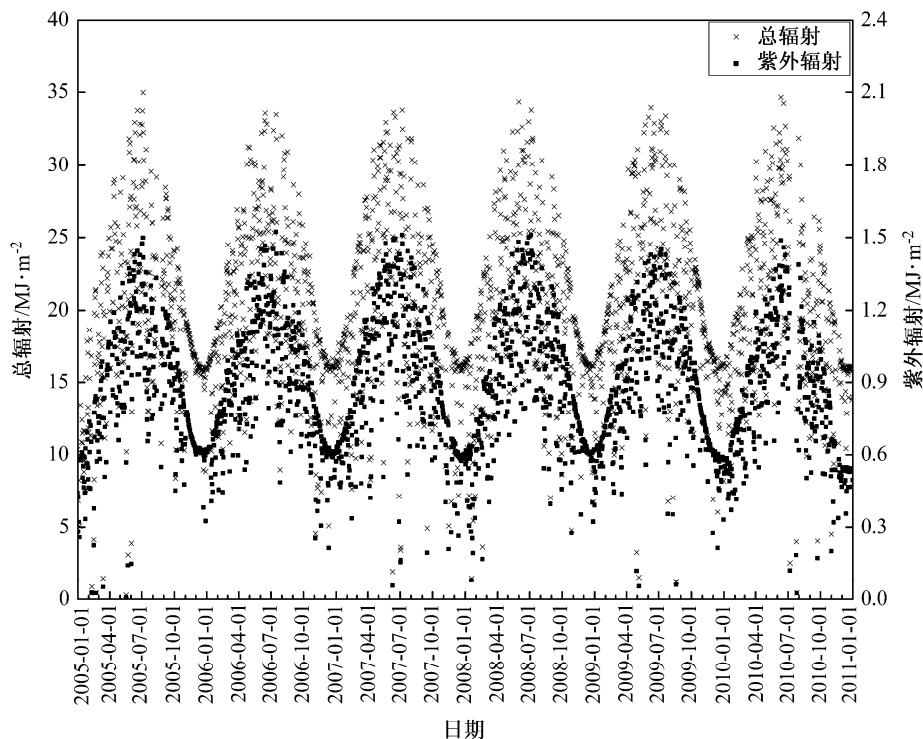


图 1 拉萨 2005~2010 年总辐射和紫外辐射日累积值的逐日变化

Fig. 1 Temporal variation of the daily total values of solar radiation and ultraviolet (UV) radiation in Lhasa during 2005–2010

太阳总辐射和紫外辐射的因素很多，导致每天的观测结果都有所差异，但各年太阳总辐射和紫外辐射的变化范围和变化规律都表现出相同的特征。6 年的太阳总辐射日累积值基本维持在 $10\sim35\text{ MJ/m}^2$ 之间，平均值为 $20.06\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，紫外辐射日累积值基本维持在 $0.4\sim1.6\text{ MJ/m}^2$ 之间，平均值为 $0.87\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。这要高于我国其他地区的观测结果，张运林和秦伯强 (2002) 指出太湖地区太阳紫外辐射年平均日总量为 $0.73\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，王晶和侯红英 (2006) 发现青岛地区太阳紫外辐射年总累积量仅为 $80.21\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，另外祝青林等 (2005) 对我国紫外辐射空间分布特征的描述中也指出，青藏高原是我国紫外辐射最强的区域。造成这种现象的原因主要是因为青藏高原海拔高度高，空气比较稀薄，对太阳辐射的削弱小导致到达地面的太阳辐射很强。同时各年太阳总辐射和紫外辐射都明显存在着一致的季节变化特征，一年中的变化曲线大致呈现为单峰型，即夏季大、冬季小，夏季总辐射和紫外辐射日累积值最大可分别达 34.98 MJ/m^2 (2005-07-05) 和 1.52 MJ/m^2 (2006-07-16)，冬季最小分别为 0.45 MJ/m^2 (2005-02-22) 和 0.03 MJ/m^2 (2005-02-22)。造成这种变化规律的原因是地球公转导致一年中太阳位置的季节变化，夏季太阳直射点靠近北回归线，到达青藏高原的天文辐射本身就较强，而到了冬季太阳直射点南移到靠近南回归线，青藏高原

接受到的天文辐射变小。另外，从 6 年的逐日变化可以看出，紫外辐射大致有着逐年递减的趋势，其年平均日累计值由 2005 年的 $0.86\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 降到了 2010 年的 $0.82\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，这可能与拉萨近年来气溶胶光学厚度 (AOD) 的增加有关。王莉莉等 (2007) 指出中国地区 MODIS 产品的适用性存在较大地域和季节性差异，青藏高原地区 MODIS 产品可利用率差，并且满足 NASA 误差范围的 modis 产品只有夏季才可达到 70% 以上。表 2 给出了拉萨 2005~2010 年各年 6 月的月平均气溶胶光学厚度，从中可以看出其值大致呈现增加趋势。

表 2 拉萨 2005~2010 年各年 6 月的月平均气溶胶光学厚度 (AOD)

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010
AOD	0.156	0.139	0.169	0.174	0.172	0.167

图 2 为 6 年中总辐射和紫外辐射月平均日累积值的变化规律，从中也可以看出总辐射和紫外辐射变化一致和“夏大冬小”的特征。总辐射和紫外辐射月平均日累积值最大分别为 2009 年 6 月的 $26.91\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 2006 年 6 月的 $1.20\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，最小值分别为 2005 年 1 月的 $11.19\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 2008 年 1 月的 $0.49\text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。同时发现总辐射和紫外

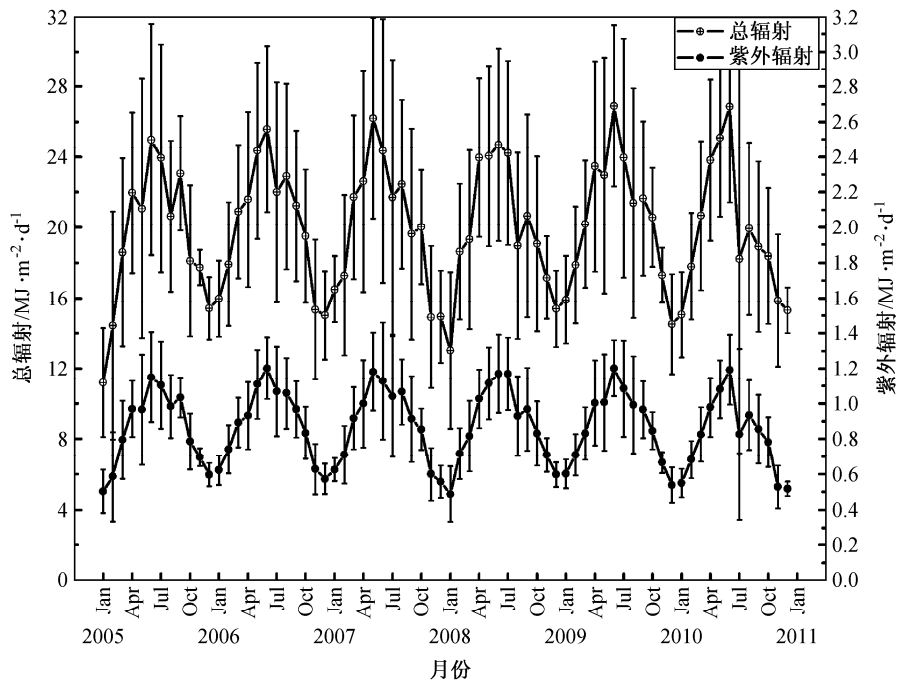


图 2 拉萨 2005~2010 年总辐射和紫外辐射月平均日累积值的变化
Fig.2 Temporal variation of the monthly average values of solar radiation and UV radiation in Lhasa during 2005~2010

辐射月平均日累积值的变化幅度在夏季要大于冬季,这与拉萨夏季雨量比较集中、每天的云量差别较大有关。表 3 给出了拉萨 2005~2010 年 6 年平均的月降水量,从中可以看出拉萨干湿季比较明显,降水多集中在 6~9 月份,可达到全年降水的 84%。

表 3 拉萨 2005~2010 年平均月降水量

Table 3 Mean of the monthly precipitation in Lhasa during 2005~2010

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降水量/mm	0	1	4.2	15.7	35.3	72.2	100.7	127.8	55.1	11.1	2.4	0

从 2010 年总辐射和紫外辐射年平均小时累积值的日变化图(图 3)中可以看出,总辐射和紫外辐射具有一致的日变化规律,即早晨 [06:00 (北京时,下同)] 总辐射和紫外辐射量较小,分别为 0.227 MJ/m^2 和 0.009 MJ/m^2 ,随着太阳高度角的增大,辐射量逐渐增强,到一天正午(12:00)时达到最大值,分别为 2.970 MJ/m^2 和 0.126 MJ/m^2 ,随后太阳高度角开始减小,辐射量也逐渐减小,到 18:00 时已分别减小到 0.548 MJ/m^2 和 0.018 MJ/m^2 。这主要是与地球自转导致太阳高度角的日变化规律有关,有关研究表明,到达地面的太阳总辐射和紫外辐射与太阳高度角的正弦成正比。

4 紫外辐射与总辐射比值的变化特征

4.1 紫外辐射与总辐射比值的时间变化特征

紫外辐射不仅在太阳辐射中扮演着极其重要的角色,又有着与太阳总辐射一致的季节和日变化特征,因此研究二者比值的变化规律有助于我们更好地了解 and 估量紫外辐射。

图 4 和图 5 分别给出了 2005~2010 年紫外辐射和总辐射比值的月平均变化和年平均日小时变化。6 年中紫外辐射和总辐射比值的平均值为 0.0441,月均值基本上维持在 0.033~0.052 之间,并且也存在着明显的季节变化特征,即夏季最大、春秋次之、冬季最小,6 年的最大值为 2008 年 6 月的 0.0518,最小值为 2010 年 11 月的 0.0331,这与江灏和季国良(1996)的研究结果相同。同时,发现紫外辐射与总辐射比值也大致呈现逐年递减的趋势,2010 年的年均值为 0.0427,相比 2005 年的 0.0446 降低了 4.3%。这可能与拉萨近年来水汽含量的减少有关,表 4 给出了拉萨 2005~2010 年年平均水汽密度的统计结果,从中可以看出这 6 年的年平均水汽密度大致呈现递减趋势。大气中的水汽对近红外辐射

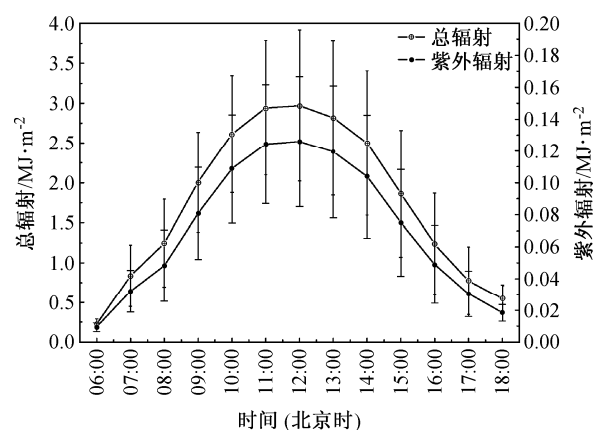


图 3 拉萨 2010 年总辐射和紫外辐射年平均小时累积值的日变化
Fig. 3 Diurnal variation of the yearly mean hourly values of solar radiation and UV radiation in Lhasa in 2010

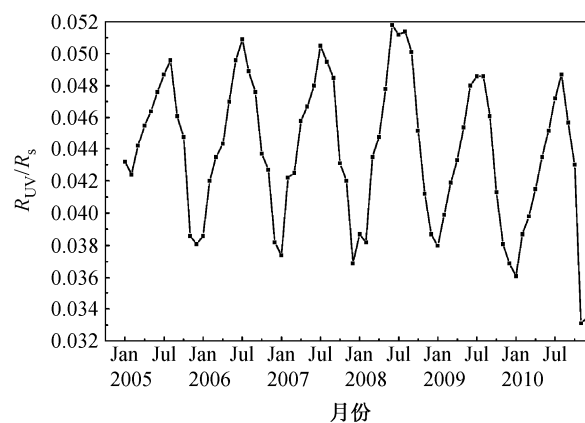


图 4 拉萨 2005~2010 年紫外辐射 (R_{UV}) 与总辐射 (R_s) 比值的月平均变化
Fig. 4 Temporal variation of the monthly mean ratio of UV radiation (R_{UV}) to solar radiation (R_s) in Lhasa during 2005~2010

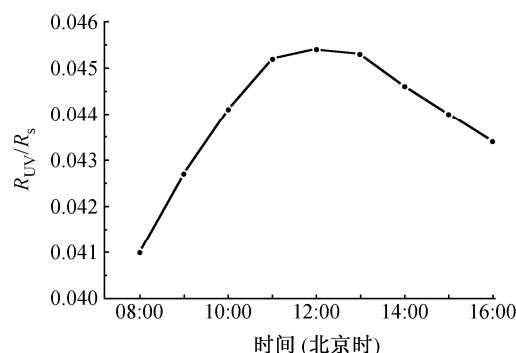


图 5 拉萨 2005~2010 年紫外辐射与总辐射比值的年平均日小时变化
Fig. 5 Diurnal variation of the yearly mean hourly values of R_{UV}/R_s in Lhasa during 2005~2010

的吸收较强,而对短波辐射的吸收相对较少,水汽含量的减少将会导致更多的近红外辐射到达地面,从而导致紫外辐射与总辐射的比值变小。紫外辐射与总辐射比值的日变化也有着正午大、早晚小的规

律，正午最大值可达到 0.0454，并且下午 16:00 的比值要高于早晨 8:00，主要与青藏高原早晨太阳日升相对迟、晚上日落时间相对晚有关。

表 4 拉萨 2005~2010 年年平均水汽密度
Table 4 Yearly mean of the water vapor density in Lhasa during 2005–2010

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010
水汽密度/g·m ⁻³	4.13	3.87	3.79	4.07	3.86	3.67

注：水汽密度计算公式为 $\rho_v = \varepsilon e / R_d T$ ，式中 ε 取 0.622， R_d 为干空气的比气体常数(取 287.05 J·kg⁻¹·K⁻¹)， e 为水汽压 (hPa)， T 为温度 (K)。

4.2 紫外辐射与总辐射比值与平均晴空指数 K_s 的关系

影响到达地面紫外辐射量的因子除了太阳方位角、太阳高度角以及臭氧的选择性吸收以外，大气中云和气溶胶的影响也极为重要。由于对云和气溶胶的观测较少，定量化的研究也比较困难，通常定义平均晴空指数 K_s （地面观测到的实际总辐射与大气层顶的辐射总量的比值）作为云和气溶胶的指示因子。图 6 为 2005~2010 年瞬时的紫外辐射与总辐射比值 (R_{UV}/R_s) 与平均晴空指数 (K_s) 的关系图，从图中可以看出，当平均晴空指数大于 0.6 时，紫外辐射与总辐射的比值除个别点外基本上在 0.03~0.05 之间，随着 K_s 的进一步增大，比值更趋向于固定值 0.04；而在平均晴空指数小于 0.6 时，紫外辐射与总辐射的比值变化范围比较大，特别是 K_s 小于 0.4 时，比值的变化范围

可达 0.02~0.08。同时，紫外辐射与总辐射的比值大致表现为随着 K_s 的减小而增大的趋势，这与沈钟平和张华 (2009) 利用高分辨率辐射传输模式的研究结果一致。该文指出虽然随着低云/中云云量的增加，各波段的地面太阳辐射通量均减小，但紫外辐射在总辐射中所占的比例却是增加的。造成这种现象原因是中低云（水云）在不同的光谱区间对太阳辐射的消弱作用存在很大的差异，水云是红外辐射最有效的吸收体，从而导致红外辐射通量随着云量增加而减小的速度要比可见光和紫外辐射快得多，紫外辐射下降最慢；同时由于紫外辐射波长比较短，多次散射强，可能造成衰减的能量在散射辐射中得到部分补偿，最终导致紫外辐射比例的增加。

表 5 是 2005~2010 各年不同的天气条件 (K_s) 下日平均的紫外辐射与总辐射比值的统计结果，结果表明日平均的晴空指数大多集中在 $0.4 \leq K_s < 0.8$ 的范围内，在 6 年的有效观测天 (2083 天) 内 $0.4 \leq K_s < 0.6$ 的天占到了 51.8%， $0.6 \leq K_s < 0.8$ 的天占到了 35.2%，而 $K_s \geq 0.8$ 和 $K_s < 0.4$ 的天只分别占 6.3% 和 6.7%。另外随着 K_s 的减小，不同的天气条件下各年紫外辐射与总辐射比值的日均值呈现增加的趋势，并且变化范围也逐渐增大。6 年的日平均紫外辐射与总辐射比值在 $K_s \geq 0.8$ 时为 0.036，到 $K_s < 0.4$ 时增大到 0.053，并且变化范围也由 0.040~0.043 增大到 0.024~0.067。

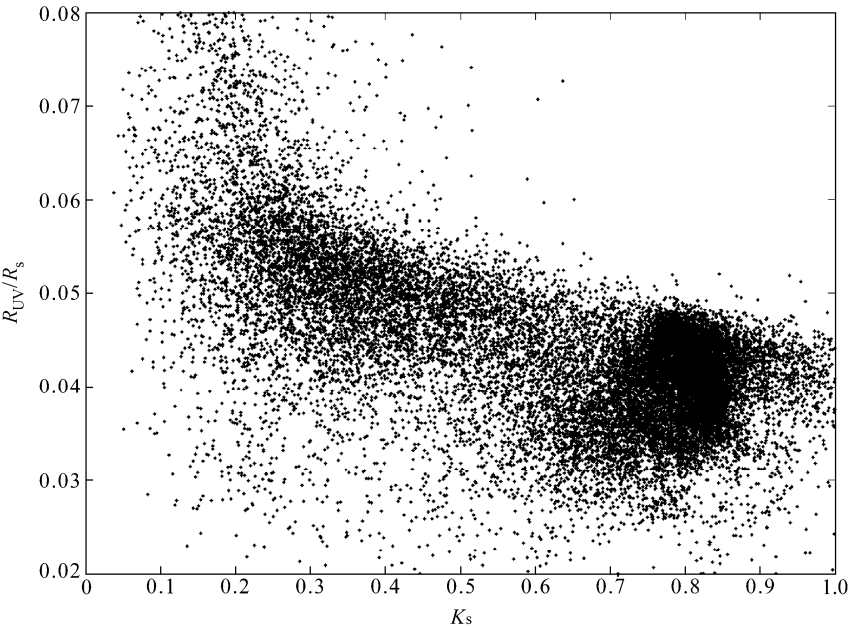


图 6 2005~2010 年瞬时紫外辐射与总辐射比值与平均晴空指数的关系
Fig. 6 Dependence of the ratio of R_{UV} to R_s on the clearness index (K_s) during 2005–2010

表 5 各种天气条件 (K_s) 下紫外辐射与总辐射比值日平均值统计结果
Table 5 Statistical results of the daily mean ratio of R_{UV} to R_s in the different weather conditions (K_s)

	$K_s \geq 0.8$				$0.6 \leq K_s < 0.8$				$0.4 \leq K_s < 0.6$				$K_s < 0.4$			
	平均值	最大值	最小值	天数	平均值	最大值	最小值	天数	平均值	最大值	最小值	天数	平均值	最大值	最小值	天数
2005 年 (324 天)					0.041	0.053	0.031	182	0.048	0.057	0.037	123	0.052	0.059	0.024	19
2006 年 (364 天)	0.038	0.043	0.034	8	0.041	0.053	0.036	198	0.048	0.060	0.030	140	0.053	0.059	0.045	18
2007 年 (352 天)	0.037	0.041	0.035	24	0.041	0.052	0.035	192	0.049	0.062	0.040	110	0.052	0.060	0.029	26
2008 年 (343 天)	0.037	0.040	0.035	23	0.042	0.053	0.035	154	0.049	0.063	0.034	132	0.053	0.065	0.039	34
2009 年 (363 天)	0.036	0.038	0.034	25	0.041	0.050	0.033	208	0.047	0.057	0.036	112	0.051	0.055	0.041	18
2010 年 (337 天)	0.034	0.041	0.030	52	0.040	0.057	0.031	145	0.048	0.057	0.031	116	0.054	0.067	0.040	24
2005~2010 年 (2083 天)	0.036	0.043	0.040	132	0.041	0.057	0.031	1079	0.048	0.063	0.030	733	0.053	0.067	0.024	139

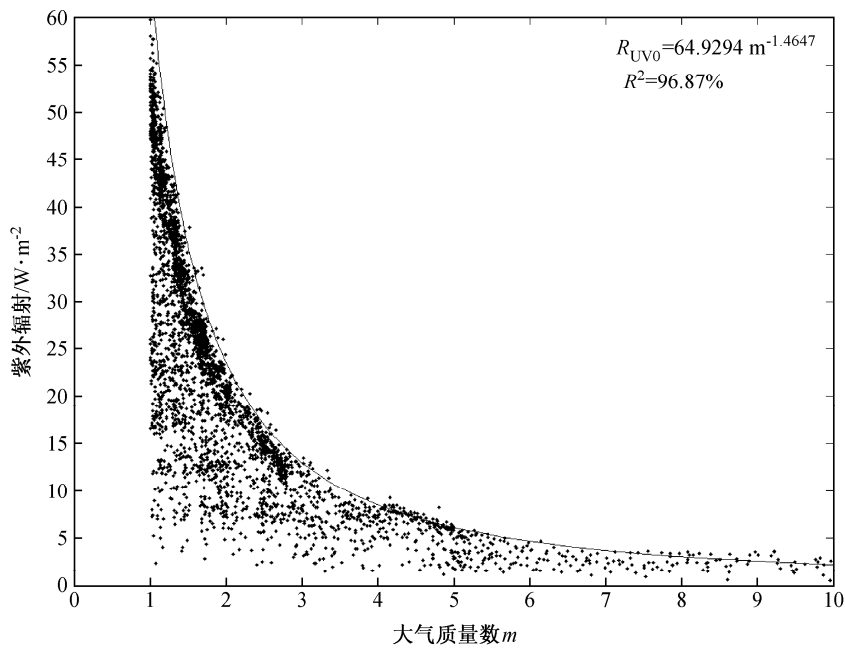


图 7 2010 年紫外辐射和大气质量数瞬时值的关系
Fig.7 Dependence of hourly ultraviolet radiation on optical air mass in 2010

5 紫外辐射估算公式的建立

5.1 紫外辐射与大气质量数的关系

为了定量地考虑太阳高度角对紫外辐射量的影响,我们采取大气质量数作为指示因子。大气质量数(m)的准确定义是日光自 θ 角倾斜入射时与自天顶角入射时的光学厚度之比,另外,考虑到吸收太阳紫外辐射最主要的臭氧多集中分布在平流层,其密度垂直廓线与干空气有很大不同,Robinson 又给出了如下比较简便的经验公式(盛裴轩等,2003)。

$$m_0 = \frac{1 + z_3 / R_E}{[\cos^2 \theta + 2(z_3 / R_E)]^{1/2}},$$

式中, z_3 为臭氧分布的峰值高度,一般为 22 km,

R_E 为地球平均半径。从中可以看出随着太阳天顶角 θ 的增大,大气质量数是增大的。

图 7 给出了 2010 年紫外辐射和大气质量数瞬时值的关系,从整体上来看随着大气质量数的增加,到达地面的紫外辐射量是减小的,但是对应点的离散度很大,这也反映了太阳高度角(大气质量数)并不是影响到达地面紫外辐射量的唯一因子。

同时从图 7 中还可以发现大气质量数和与之对应的最大紫外辐射(R_{UV0})之间存在着明显的幂指数关系,通过拟合可以得到,

$$R_{UV0} = 64.9294 m^{-1.4647}, R^2 = 96.87\%.$$

式中, m 为大气质量数, R^2 为相关系数。

5.2 紫外辐射估算公式的建立

综合考虑太阳高度角与云和气溶胶对地面接收

到的紫外辐射量的影响, Foyo-moreno (1999) 提出了基于大气质量数和平均晴空指数 (K_s) 的地面紫外辐射估算方案, 建立了形式如 $R_{UV} = a + b(K_s \cdot R_{UV0})$ 的估算公式。

本文借鉴此方法对 2010 年的瞬时观测数据进行了拟合 (图 8), 得到的拉萨地面紫外辐射的估算公式为

$$\begin{aligned} R_{UV} &= 0.9359(K_s \cdot R_{UV0}) + 2.8645 \\ &= 0.9359[K_s \cdot (64.9294m^{-1.4647})] + 2.8645, \\ R^2 &= 97.84\%. \end{aligned}$$

5.3 估算公式的检验

为了检验估算公式的精度和有效性, 利用建立的紫外辐射估算公式对 2005~2009 年的瞬时紫外辐射数据进行了估算, 并与瞬时的观测值进行了比较。图 9 给出了 2008 年和 2009 年紫外辐射瞬时估算值与观测值的比较结果, 表 6 给出了 2005~2009 年比较结果的统计特征。从中可以看出估算公式具有很高的精度, 估算公式对瞬时紫外辐射的估计仅有略微的偏小, 相关系数都达到了 98% 以上, 各年瞬时估算值与观测值的平均相对误差最大仅为

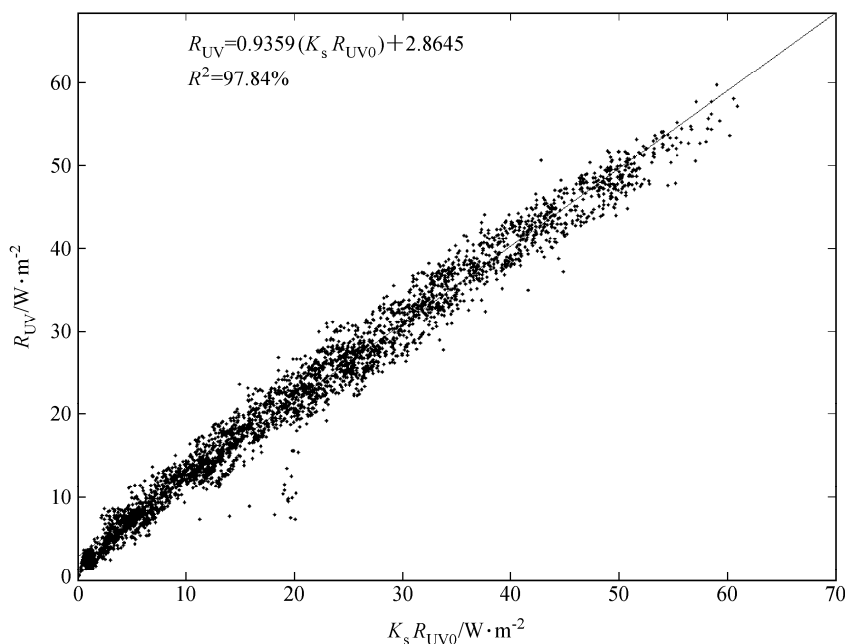


图 8 紫外辐射估算公式的建立

Fig.8 Establishing of the estimating equation for ultraviolet radiation

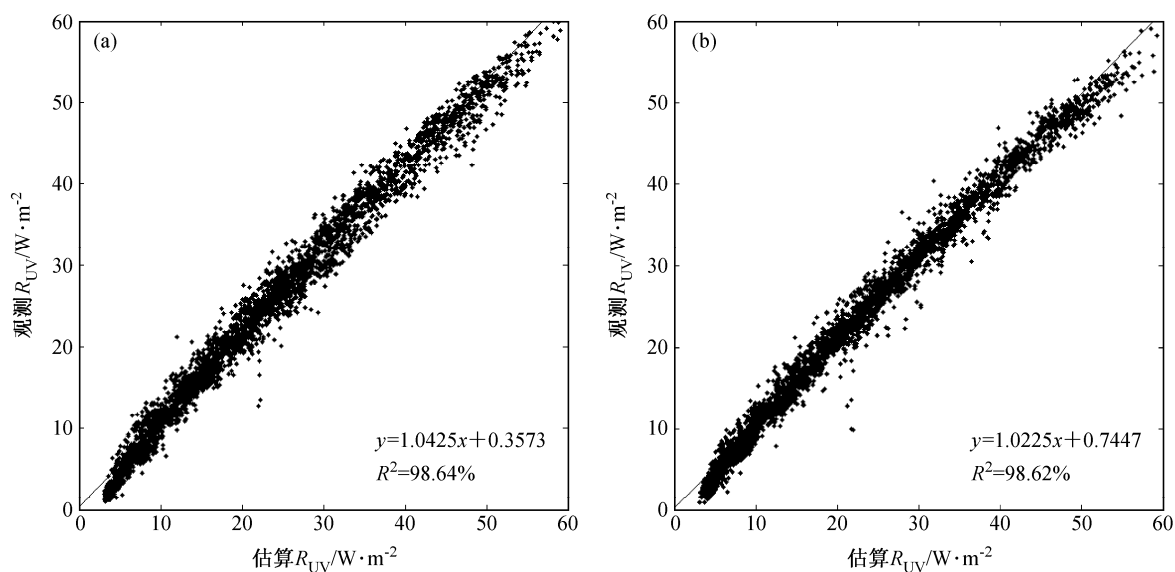


图 9 2008 年 (a) 和 2009 年 (b) 紫外辐射估算值与观测值的比较

Fig.9 Comparison of R_{UV} measured and calculated using the experimental estimating equation in (a) 2008 and (b) 2009

8.66%。

表 6 2005~2009 年紫外辐射瞬时估算值与观测值比较的统计特征

Table 6 Statistical characteristics of the comparion of the hourly UV radiation measured and calculated using the experimental estimating equation during 2005–2009

	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
斜率	1.0160	1.0474	1.0378	1.0425	1.0225
截距	0.2138	0.3041	0.4513	0.3537	0.7447
相关系数	98.66%	98.41%	98.78%	98.64%	98.62%
相对误差	7.83%	7.97%	7.93%	8.66%	6.60%

5.4 紫外辐射数据重构

利用拟合得到的估算公式，对拉萨 2005~2009 年共 5 年的历史紫外辐射数据进行了重构，图 10 给出了 5 年重构紫外辐射日累积值的逐日变化，并与相应的观测值进行了对比。从中可以看出本文建立的估算公式可很好的用于拉萨地面紫外辐射的估量，5 年的平均相对误差仅为 5.5%，同时发现各年的相对误差分布具有“夏季相对误差较大，冬季相对误差较小”的特征，这可能与青藏高原夏季雨水充沛、雨量集中而导致紫外辐射估计困难有关。

6 结论

利用拉萨站 2005~2010 年共 6 年的辐射观测资料对拉萨紫外辐射变化特征进行了分析，得到了如下结论：

(1) 紫外辐射和总辐射有着一致的年、月、日变化规律，即由地球公转导致的紫外辐射和总辐射“夏季大、冬季小”的季节变化和由地球自转导致的紫外辐射和总辐射“正午大、早晚小”的日变化特征。6 年的紫外日累积值的平均值为 $0.87 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，夏季最大为 $1.52 \text{ MJ}/\text{m}^2$ ，冬季最小为 $0.03 \text{ MJ}/\text{m}^2$ 。日变化规律表现为正午大、早晚小。6 年的逐日紫外辐射有着逐年递减的趋势，其年平均日累计值由 2005 年的 $0.86 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 降到了 2010 年的 $0.82 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ，这与拉萨近年来气溶胶光学厚度增加有关。

(2) 紫外辐射与总辐射比值也存在着明显的季节变化，即夏季最大、春秋次之、冬季最小，6 年的平均值为 0.0418，月均值基本上维持在 0.033~0.052 之间。紫外辐射与总辐射比值的日变化表现为正午大、早晚小的规律，正午最大值可达到 0.0454。同时，紫外辐射与总辐射比值也呈现逐年递减的趋势，年均值在 2010 年为 0.0427，相比 2005 年的 0.0446 降低了 4.3%。

(3) 同时，紫外辐射和总辐射的比值与平均晴

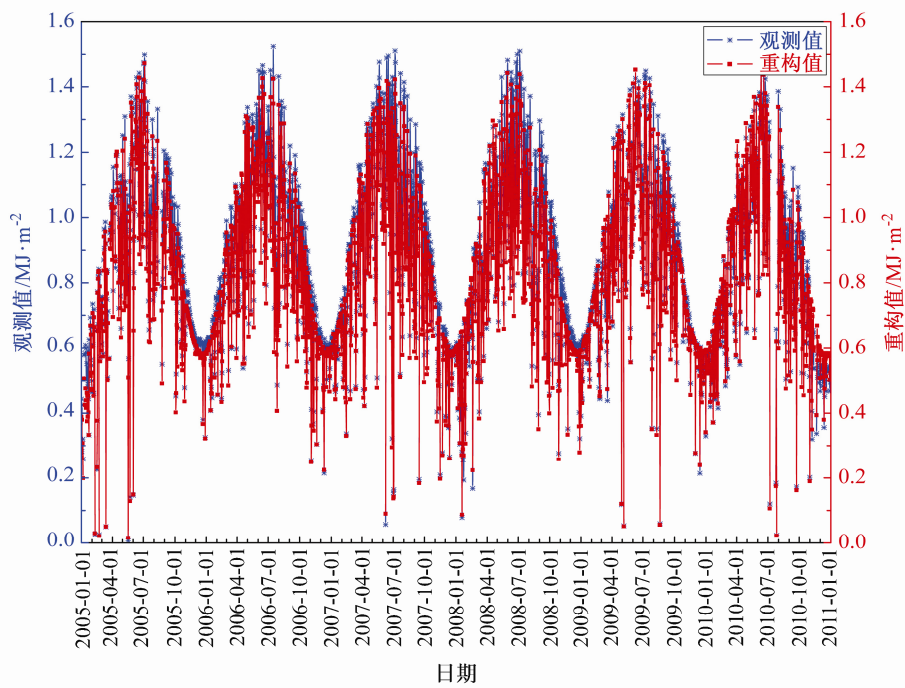


图 10 2005~2009 年重构紫外辐射日累积值与观测值的逐日变化
Fig.10 Temporal variation of the daily total values of R_{UV} measured and calculated using the experimental estimating equation during 2005–2009

空指数 (K_s) 也有着很好的相关性, 当 K_s 大于 0.6 时, 紫外辐射与总辐射的比值除个别点外基本上在 0.03~0.05 之间, 随着 K_s 的进一步增大, 比值更接近于固定值 0.04, 而在平均晴空指数小于 0.6 时, 紫外辐射与总辐射的比值变化范围比较大, 特别是 K_s 小于 0.4 时, 比值的变化范围可达 0.02~0.08。可见, 随着 K_s 的减小, 紫外辐射和总辐射的比值及其变化范围都有增大的趋势。

(4) 考虑到紫外辐射与太阳高度角 (大气质量数) 和平均晴空指数的关系, 利用 2010 年的辐射观测数据建立了拉萨紫外辐射的估算公式, 并用 2005~2009 年的辐射数据对估算公式进行了检验。发现估算公式具有很高的精度, 估算公式对瞬时紫外辐射的估计仅有略微的偏小, 相关系数都达到了 98% 以上, 各年瞬时估算值与观测值的平均相对误差最大仅为 8.66%。最后, 对 2005~2009 年的日紫外辐射量进行了重构, 并与相应的观测值进行了比较, 5 年的平均相对误差仅为 5.5%, 同时发现各年的相对误差分布具有“夏季相对误差较大, 冬季相对误差较小”的特征, 这可能与青藏高原夏季雨水充沛、雨量集中而导致紫外辐射估计困难有关。

本文利用大气质量数和平均晴空指数建立的拉萨地面紫外辐射估算公式虽然具有很高的估算精度, 但由于影响到地面紫外辐射量的其它因子还有很多, 同时观测站点太少, 使得辐射观测数据的代表性受到限制, 难免会对估算公式的精度和代表性产生影响, 亟需进一步的研究。

致谢 感谢 NASA 提供高质量的 MODIS 卫星产品, 感谢中国生态系统研究网络 (CERN) 拉萨农业生态试验站台站人员的维护, 为研究提供了高质量的观测数据。

参考文献 (References)

- 卞建春, 王庚辰, 陈洪滨, 等. 2006. 2003 年 12 月青藏高原上空出现微型臭氧洞 [J]. 科学通报, 51 (5): 606–609. Bian Jianchun, Wang Gengchen, Chen Hongbin, et al. 2006. A mini ozone hole appeared over the Tibetan Plateau in December 2003 [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (5): 606–609.
- Diffey B L. 1991. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems [J]. Physics in Medicine and Biology, 36 (3): 299–328.
- Farman J D, Gardiner B G, Shanklin J D. 1985. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction [J]. Nature, 315 (6016): 207–210.
- Foyo-Moreno I, Vida J, Alados-Arboledas L. 1999. A simple all weather model to estimate ultraviolet solar radiation (290–385 nm) [J]. J. Appl. Meteor., 38 (7): 1020–1026.
- Geger M, Diabaté L, Ménard L, et al. 2002. A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation [J]. Solar Energy, 73 (6): 475–480.
- 胡波, 王跃思, 刘广仁. 2007. 北京城市紫外辐射变化特征及经验估算方程 [J]. 高原气象, 26 (3): 511–518. Hu Bo, Wang Yuesi, Liu Guangren. 2007. The variation characteristics and estimating model for ultraviolet radiation in Beijing [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (3): 511–518.
- Hu Bo, Wang Yuesi, Liu Guangren. 2008. Influences of the clearness index on UV solar radiation for two locations in the Tibetan Plateau—Lhasa and Haibei [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 25 (5): 885–896.
- Huang Meiling, Jiang Hong, Ju Weimin, et al. 2011. Ultraviolet radiation over two lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River, China: An innovative model for UV estimation [J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 22 (5): 491–506, doi: 10.3319/TAO.2011.05.02. 01 (A).
- 贾龙, 葛茂发, 徐永福, 等. 2006. 大气臭氧化学研究进展 [J]. 化学进展, 18 (11): 1565–1574. Jia Long, Ge Maofa, Xu Yongfu, et al. 2006. Advances in atmospheric ozone chemistry [J]. Progress in Chemistry (in Chinese), 18 (11): 1565–1574.
- 江灏, 季国良. 1996. 五道梁地区的太阳紫外辐射 [J]. 高原气象, 15 (2): 141–146. Jiang Hao, Ji Guoliang. 1996. The solar ultraviolet radiation over the Wudaoliang region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 15 (2): 141–146.
- 刘晶淼, 丁裕国, 黄永德, 等. 2003. 太阳紫外辐射强度与气象要素的相关分析 [J]. 高原气象, 22 (1): 45–50. Liu Jingmiao, Ding Yuguo, Huang Yongde, et al. 2003. Correlation analyses between intensity of solar ultraviolet radiation and meteorological elements [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 22 (1): 45–50.
- Rigollier C, Bauer O, Wald L. 2000. On the clear sky model of the 4th European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method [J]. Solar Energy, 68 (1): 33–48.
- 沈钟平, 张华. 2009. 影响地面太阳辐射及其谱分布的因子分析 [J]. 太阳能学报, 30 (10): 1389–1395. Shen Zhongping, Zhang Hua. 2009. Analysis on the factors affecting surface solar radiation and its spectral distribution [J]. Acta Energiae Solaris Sinica (in Chinese), 30 (10): 1389–1395.
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 2003. 大气物理学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 92–93. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. Atmospheric Physics [M] (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 92–93.
- 王莉莉, 辛金元, 王跃思, 等. 2007. CSHNET 观测网评估 MODIS 气溶胶产品在中国区域的适用性 [J]. 科学通报, 52 (4): 477–486. Wang Lili, Xin Jinyuan, Wang Yuesi, et al. 2007. Assessing the applicability of MODIS aerosol products using CSHNET observation network in China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (4): 477–486.
- 王晶, 侯红英. 2006. 青岛地区太阳紫外辐射研究 [J]. 中国海洋大学学报 (自然科学版), 36 (4): 671–676. Wang Jing, Hou Hongying. 2006. Research of solar ultraviolet radiation in the Qingdao region [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 36 (4): 671–676.

- 王普才, 吴北婴, 章文星. 1999. 影响地面紫外辐射的因素分析 [J]. 大气科学, 23 (1): 1–8. Wang Pucui, Wu Beiyang, Zhang Wenxing. 1999. Analysis on the factors affecting surface UV radiation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (1): 1–8.
- 王维和, 张兴赢, 安兴琴, 等. 2010. 风云三号气象卫星全球臭氧总量反演和真实性检验结果分析 [J]. 科学通报, 55 (17): 1726–1733. Wang Weihe, Zhang Xingying, An Xingqin, et al. 2010. Analysis for retrieval and validation results of FY-3 Total Ozone Unit (TOU) [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 55 (17): 1726–1733.
- 王咏梅, 王英鉴, 王维和, 等. 2009. FY-3 卫星紫外臭氧总量探测仪 [J]. 科学通报, 54 (23): 3778–3783. Wang Yongmei, Wang Yingjian, Wang Weihe, et al. 2009. FY-3 satellite Ultraviolet Total Ozone Unit [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 54 (23): 3778–3783.
- 肖钟湧, 江洪. 2010. 利用遥感监测青藏高原上空臭氧总量 30a 的变化 [J]. 环境科学, 31 (11): 2569–2574. Xiao Zhongyong, Jiang Hong. 2010. Variation of total ozone over Tibetain Plateau during 30 years monitored by remotely sensed data [J]. Environmental Science (in Chinese), 31 (11): 2569–2574.
- 熊效振, 王庚辰. 1993. 中国地区近地面太阳紫外辐射的分布及其对大气臭氧层破坏的响应 [J]. 大气科学, 17 (5): 611–620. Xiong Xiaozhen, Wang Gengchen. 1993. Distribution of solar ultraviolet radiation at the ground and its response to atmospheric ozone depletion in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 17 (5): 611–620.
- 张运林, 秦伯强. 2002. 太湖地区太阳紫外辐射的初步研究 [J]. 气象科学, 22 (1): 93–99. Zhang Yunlin, Qin Boqiang. 2002. The preliminary study of solar ultraviolet radiation in Taihu region [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 22 (1): 93–99.
- 周秀骥, 罗超, 李维亮, 等. 1995. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心 [J]. 科学通报, 40 (15), 1396–1398. Zhou Xiuji, Luo Chao, Li Weiliang, et al. 1995. Changes of total ozone in China and low center of Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 40 (15): 1396–1398.
- 祝青林, 于贵瑞, 蔡福, 等. 2005. 中国紫外辐射的空间分布特征 [J]. 资源科学, 27 (1): 108–133. Zhu Qinglin, Yu Guirui, Cai Fu, et al. 2005. Spatialization research on ultraviolet radiation in China [J]. Resources Science (in Chinese), 27 (1): 108–133.