

刘慧, 胡波, 王跃思, 等. 2015. 山东禹城紫外辐射变化特征及其估测方程的建立 [J]. 大气科学, 39 (3): 503–512, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.14129. Liu Hui, Hu Bo, Wang Yuesi, et al. 2015. Variation characteristics and establishment of estimating equation for ultraviolet radiation in Yucheng, Shandong Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (3): 503–512.

山东禹城紫外辐射变化特征及其估测方程的建立

刘慧^{1,2} 胡波² 王跃思^{1,2} 王式功¹

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

摘 要 本文对 2005~2011 年山东禹城地区观测得到的紫外辐射的时间变化特征及紫外辐射与总辐射比值的特征进行了分析, 并结合气温、降水和露点温度资料建立了禹城地区的紫外辐射估测方程。结果表明: 紫外辐射日累计值的变化范围为 0.10~1.20 MJ m⁻² d⁻¹, 年平均值为 0.468 MJ m⁻² d⁻¹; 紫外辐射日、季节变化规律与总辐射一致, 季节变化都表现为冬季小夏季大, 最小值出现在 1 月, 最大值出现在 6 月, 日变化则呈现早晚小中午大的特征; 紫外辐射与总辐射的比值范围为 0.023~0.046, 其季节变化特征也是冬季小夏季大, 该比值随晴空指数的增大而减小, 而在晴空指数大于 0.5 时比较稳定。利用温度日较差(日最高气温与最低气温的差值)建立了紫外辐射估测方程, 决定系数 R^2 达 0.80, 平均相对误差为 0.19, 估测紫外线等级与实测紫外线等级相差不大于 1 的数据占 95%, 该方法可以较好地进行了紫外辐射等级的估测。

关键词 紫外辐射 晴空指数 估测方程 温度日较差

文章编号 1006-9895(2015)03-0503-10

中图分类号 P422

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14129

Variation Characteristics and Establishment of Estimating Equation for Ultraviolet Radiation in Yucheng, Shandong Province

LIU Hui^{1,2}, HU Bo², WANG Yuesi^{1,2}, and WANG Shigong¹

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

Abstract The temporal variation of ultraviolet (UV) radiation and the ratio of UV radiation to broadband solar radiation were analyzed in Yucheng using the radiation observations of 2005–2011, and the estimating equation of UV radiation was established using the data of air temperature, precipitation, and dew point temperature. The results showed that the UV radiation has consistent variation characteristics with solar radiation; the cumulative value range was 0.10–1.20 MJ m⁻² d⁻¹, and the average value was 0.468 MJ m⁻² d⁻¹. The highest and lowest values of monthly UV radiation were measured in June and January, respectively. The highest value of daily UV radiation was measured at noon, and the lowest value occurred in the morning or at night. The range of the ratio of UV radiation to solar radiation was 0.023–0.046. The seasonal highest and lowest ratios of UV radiation to solar radiation occurred in summer and winter, respectively. The ratio reduced as the clearness index increased, and the ratio was relatively stable when the clearness index was greater than 0.5. Finally, a UV radiation estimating equation was established by using temperature and precipitation. The determination

收稿日期 2014-02-21; 网络预出版日期 2014-10-09

资助项目 国家自然科学基金项目 41275165

作者简介 刘慧, 女, 1989 年出生, 硕士研究生, 研究方向为大气辐射和遥感。E-mail: liuh2012@lzu.edu.cn

通讯作者 胡波, E-mail: hb@dq.cern.ac.cn

coefficient R^2 was 0.80, and the mean bias error was 0.19. There are 95% data the difference in observed and estimated values was less than 1 level. Thus, the equation is appropriate for estimation.

Keywords UV radiation, Clearness index, Estimating equation, Diurnal temperature range

1 引言

紫外辐射 (290~400 nm) 占太阳总辐射的比例很小, 在大气层顶也只有 8% 左右 (Lovengreen et al., 2000; Santos et al., 2011), 但由于其光子能级较高, 所产生的光化学作用、植物光合作用等生物效应十分显著。紫外辐射对气候、生态环境及人类健康都有重要影响 (邓雪娇等, 2003), 特别是随着臭氧洞的发现, 紫外辐射的观测估测已逐渐成为当前研究的焦点之一。

紫外辐射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)。澳大利亚每 10 万人中有 800 人、美国每 10 万人中有 250 人得皮肤癌, 在盛行日光浴的美国和加拿大, 每年新增的皮肤癌患者超过 100 万人。因此有必要大量开展紫外辐射的观测与估测研究。

目前紫外辐射的预报方法可分为模式和统计预报两种方法 (吴兑, 2000)。沈元芳等 (2009) 应用 GRAPES (Global/Regional Assimilation and PrEdiction System) 模式中的 Goddard 短波辐射方案^①, 建立了紫外线数值预报系统。傅炳珊等 (2002) 在大气辐射传输理论的基础上, 利用中分辨率大气辐射传输模式, 建立晴空或少云天气状况下石家庄市紫外波段辐射强度及指数预报模式。李春 (2003) 依据拉萨地区不同月份紫外辐射占全波段太阳总辐射的比例关系和全波段太阳总辐射的气候学计算方法, 提出了一套紫外线指数统计估测方法。王繁强等 (2005)、毛则剑和张立峰 (2007)、丛菁等 (2009)、曲晓黎等 (2011) 分析紫外辐射与能见度、云量、温度、相对湿度等气象要素的相关性, 选出相关性较大的要素作为因子, 采用多元回归方法估测紫外辐射, 但是直接采用气温日较差来进行紫外辐射估测的研究较少, 本文拟利用 2005~2011

年长时间的辐射观测资料分析总辐射与紫外辐射的相互关系, 在此基础上通过气温日较差建立总辐射估测方法, 从而建立紫外辐射估测模型。

2 站点和数据介绍

2.1 站点介绍

禹城站 (36°40'N, 116°22'E) 位于我国华北平原东部, 该地区是典型暖温带半湿润季风气候区, 年平均气温 13.1°C, 降雨量 582 mm, 水面蒸发力 952 mm, 太阳辐射总量 5225 MJ m⁻², 日照时数 2640 小时, 大于 0°C 积温为 4951°C, 大于 10°C 积温为 4441°C, 无霜期 200 天, 光热资源丰富, 雨热同期, 有利于农业生产。

2.2 仪器介绍

气象要素使用 Milos520 (Vaisala, 芬兰) 自动气象站观测, 其中温度精度为 0.2°C, 相对湿度精度为 ±2%。自动站辐射观测使用仪器为 Kipp & Zonen (荷兰) 生产的辐射表, 辐射表的参数如表 1 所示。气象要素和辐射数据采用 DM520 数据采集器采集, 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)	CM11	±3%
紫外辐射 (0.29~0.4 μm)	CUV3	±10%

总辐射表每年在春季采用“交替法”进行标定, 标定精度为 ±3%, 紫外辐射表采用辐射标准灯和紫外一可见光谱仪进行标定, 标定精度为 ±10%。

2.3 数据质量控制

(1) 同一地理位置观测的总辐射和紫外辐射应分别小于大气层顶的总辐射与紫外辐射, 否则直接将数据剔除 (Geiger et al., 2002)。大气层顶的总辐射和紫外辐射量采取 Foyo-Moreno et al. (1999) 提出的计算方案。

(2) 夜间辐射的观测值应该小于 0, 或者由于仪器零点漂移造成不大于 5 W m⁻² 瞬时输出值, 处理时全部用 0 代替。

(3) 白天总辐射观测的极小值应该大于连续阴

① Chou M D, Suarez M J. 1999. A Solar Radiation Parameterization (CLIRAD-SW) for Atmospheric Studies. <http://climate.gsfc.nasa.gov/~chou> [2015-01-06].

天时总辐射的观测值, 即剔除白天平均无云指数(地基总辐射与大气层顶总辐射的比值)小于 0.03 的数据 (Omran, 2000)。

(4) 由于辐射仪器的余弦效应, 在太阳高度角较低时会带来很大的观测误差, 剔除太阳高度角小于 10° 的数据 (Huang et al., 2011)。

对禹城近 7 年的瞬时辐射数据进行严格的数据质量控制, 直接删除其中不合格的数据, 删除比例为 1.1% 左右。

3 紫外辐射变化特征及估算公式的建立

3.1 紫外辐射变化特征

通过 2005 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日的辐射观测数据对禹城到达地面的紫外辐射变化规律, 紫外辐射与总辐射及其相关要素的关系进行分析。

从图 1 可以看出, 总辐射和紫外辐射日累计值的季节变化规律一致, 都是冬季小, 春末夏初大, 总辐射日累计值的变化范围在 $5\sim 30 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 之间, 年均值 $13.525 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 紫外辐射日累计值的变化范围在 $0.1\sim 1.20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 之间, 年均值为 $0.468 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。造成这种变化的原因主要是地球公转导致一年中的太阳位置季节变化。夏季太阳直射点靠近北回归线, 此时华北地区的太阳高度角较大, 禹城地区接收的天文辐射较大, 即该区域的总

辐射和紫外辐射都达到极大值; 冬季则反之。Hu et al. (2010) 利用北京地区 2005 年 1 月到 2008 年 6 月的辐射资料, 得到紫外辐射平均日累计值为 $0.37\pm 0.17 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。张兴华等 (2012) 利用拉萨 2005~2010 年的辐射资料, 得到紫外辐射平均日累计值为 $0.87 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 比禹城高, 主要是因为拉萨海拔高, 空气比较稀薄, 对太阳辐射的削弱小, 到达地面的太阳辐射较强。

2005~2011 年禹城总辐射和紫外辐射的月平均日累计值变化规律如图 2 所示, 总辐射和紫外辐射呈现“夏季大冬季小”的季节变化特征。总辐射和紫外辐射月平均日累计值最小值出现在 2006 年 1 月, 其数值分别为 $4.864 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $0.139 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 最大值出现在 2009 年 6 月, 分别为 $22.693 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $0.834 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。表 2 给出了禹城 2005~2011 年月降水量的季节变化, 降水主要集中在 7、8 月份, 云量和大气中的水汽增加, 更多的太阳辐射被吸收, 总辐射与紫外辐射月平均日累计最大值都出现在 5、6 月份, 而不是相对多雨的 7、8 月份。

表 2 禹城 2005~2011 年平均月降水量的季节变化

Table 2 Mean of the monthly precipitation in Yucheng during 2005–2011

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
降水量/mm	1.0	8.0	14.4	27.9	50.3	57.9	132.1	116.1	45.0	13.6	11.4	2.7

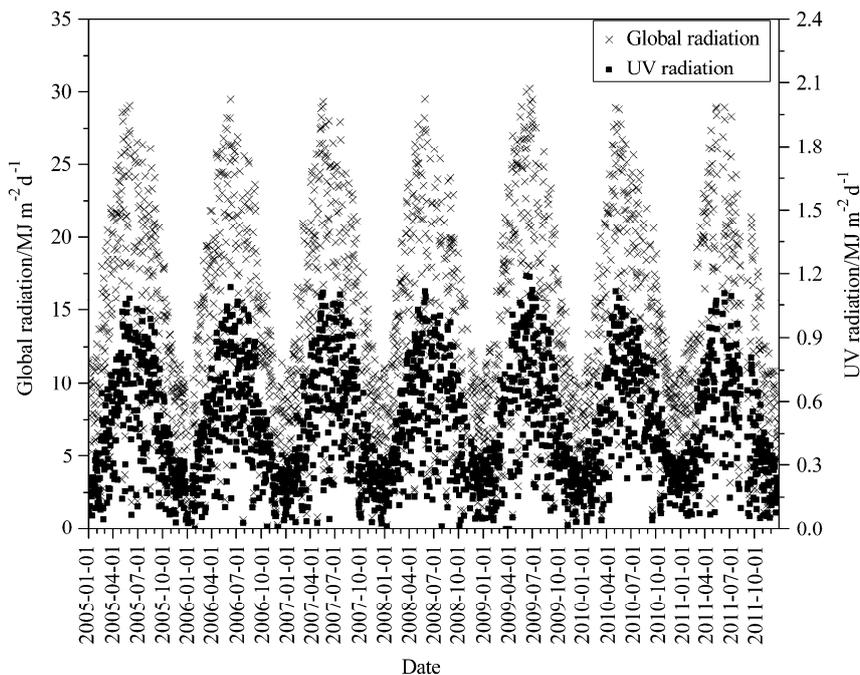


图 1 禹城 2005~2011 年总辐射和紫外辐射日累积值的逐日变化

Fig. 1 Temporal variation of the daily total values of solar radiation and ultraviolet (UV) radiation in Yucheng during 2005–2011

总辐射与紫外辐射的日变化规律一致(图3),都呈现为早晚小中午大,即06:00(地方时,下同)总辐射和紫外辐射值最低,分别为 0.298 MJ m^{-2} 和 0.01 MJ m^{-2} ;随着太阳高度角的增大总辐射和紫外辐射逐渐增大,到12:00达到最大,其值分别为 1.98 MJ m^{-2} 和 0.07 MJ m^{-2} ,之后随着太阳高度角的减小,辐射量逐渐减小,到18:00出现极小值;总辐射和紫外辐射的极小值分别为 0.299 MJ m^{-2} 和 0.01 MJ m^{-2} 。导致这种变化的主要原因是地球自转,由于太阳高度角日变化规律造成辐射的日变化特征。张兴华等(2012)利用拉萨地区2005~2010年数据得到总辐射小时累计值变化范围为 $0.227 \sim 2.970 \text{ MJ m}^{-2}$,紫外辐射为 $0.009 \sim 0.126 \text{ MJ m}^{-2}$,比禹城地区稍大。

3.2 紫外辐射与总辐射的比值

由于紫外辐射与总辐射有相同的季节变化和日变化规律,因此通过研究紫外辐射与总辐射比值的变化规律有助于我们更好地了解紫外辐射,利用该比值的变化特征结合总辐射的历史观测数据获得大量的紫外辐射用于相关的研究。图4为2005~2011年紫外辐射与总辐射比值的月变化规律图,其变化范围为 $0.023 \sim 0.046$,这与Robaa(2004)利用4年的埃及开罗数据得到的比值范围 $0.027 \sim 0.049$ 一致。江灏等(1994)利用HEIFE绿洲区1991年的观测数据得到比值范围为 $0.026 \sim 0.034$,比禹城地区略小。HEIFE绿洲区1991年平均相对湿度为49.64%,禹城2005~2011年年平均相对湿度为66.94%,可能由于禹城的水汽含量相对较高,导致比值较大。紫外辐射与总辐射比值的季节变化规律也呈现“夏季大冬季小”的特征,且夏季变化幅度大于冬季。紫外辐射与总辐射的比值最大值在2008年7月,为0.046;最小值在2005年1月,为0.023。紫外辐射与总辐射比值的季节变化主要取决于水汽的季节变化(Hu et al., 2010),用相对湿度来表征水汽含量,由图4可以看出,比值 F_{uv} 与相对湿度RH的变化一致,水汽对近红外辐射的吸收较强,而对短波辐射的吸收相对较少,水汽含量的增多使得比值变大,反之则变小。

影响到达地面的紫外辐射量的因子除了太阳高度角、臭氧外,云和气溶胶的影响也较大。然而,由于云和气溶胶的观测较少,定量化研究也比较困难,通常通过平均晴空指数(地面观测到的太阳总辐射与大气层顶的总辐射之比)作为云和气溶胶的

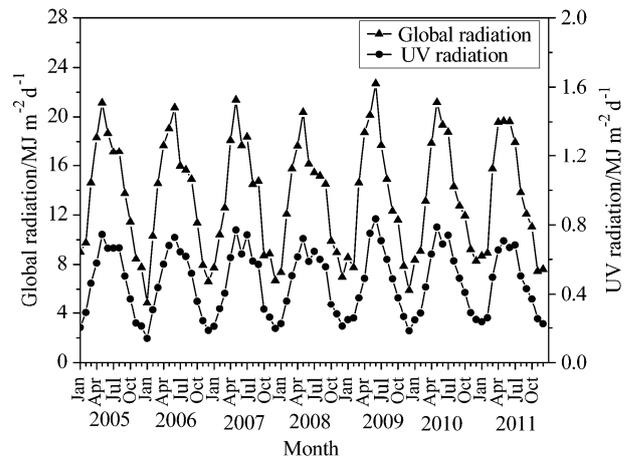


图2 2005~2011年紫外辐射的逐月变化

Fig. 2 The monthly variation of UV radiation during 2005-2011

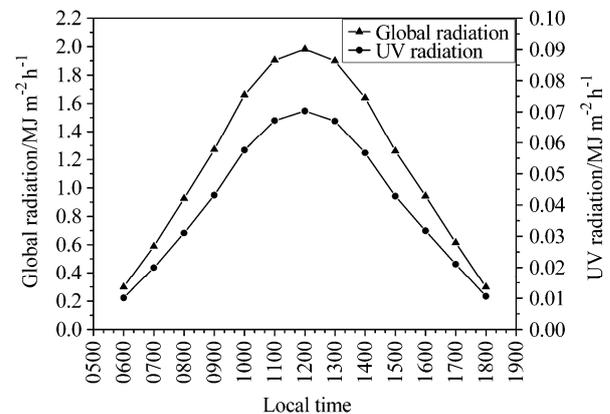


图3 近7年禹城地区总辐射和紫外辐射的日变化图

Fig. 3 Diurnal variation of the 7-year mean hourly values of solar radiation and UV radiation in Yucheng

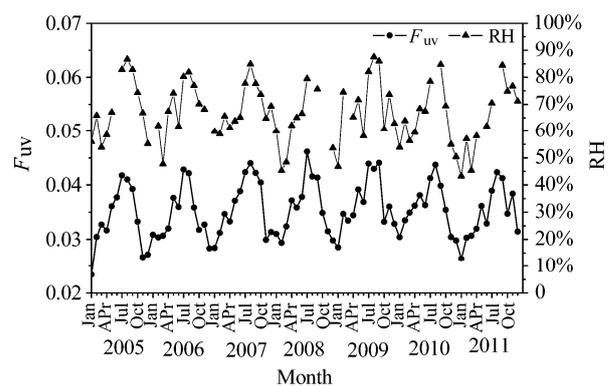


图4 2005~2011年紫外辐射与总辐射比值和相对湿度(RH)的逐月变化

Fig. 4 Temporal variation of the monthly mean ratio of ultraviolet radiation to solar radiation and relative humidity (RH) during 2005-2011

识别因子(张兴华等, 2012)来开展气溶胶、云对紫外辐射影响的研究。图5为紫外辐射与总辐射的

比值随晴空指数 K_s 的变化趋势图，在 K_s 小于 0.4 时，比值的变化范围为 0.02~0.08，波动较大，原因可能是 K_s 较小时，对应于太阳高度角较小或者云量较多的情况。在太阳高度角较小时，大气光化学路径相对较长，大气分子的瑞利散射对波长较短的紫外辐射有较强的削弱作用，致使比值较小；在云量较多时，可能由于水汽大量吸收波长较长的红外辐射致使比值较大，也可能由于水汽中的细微粒对

紫外辐射的削弱较强致使比值较小。在 K_s 大于 0.5 时比值相对比较稳定，基本维持在 0.03 左右，与 Feister and Grasnick (1992) 的结论一致，可能是因为 K_s 较大时，总辐射较高，多在夏季晴天，天气条件比较一致，使得比值相对稳定。

3.3 紫外辐射估算公式的建立

图 6 为不同 K_s 范围时，紫外辐射 (R_{uv}) 随太阳高度角正弦值 (μ) 的变化， K_s 从 0.03 开始，按 0.01

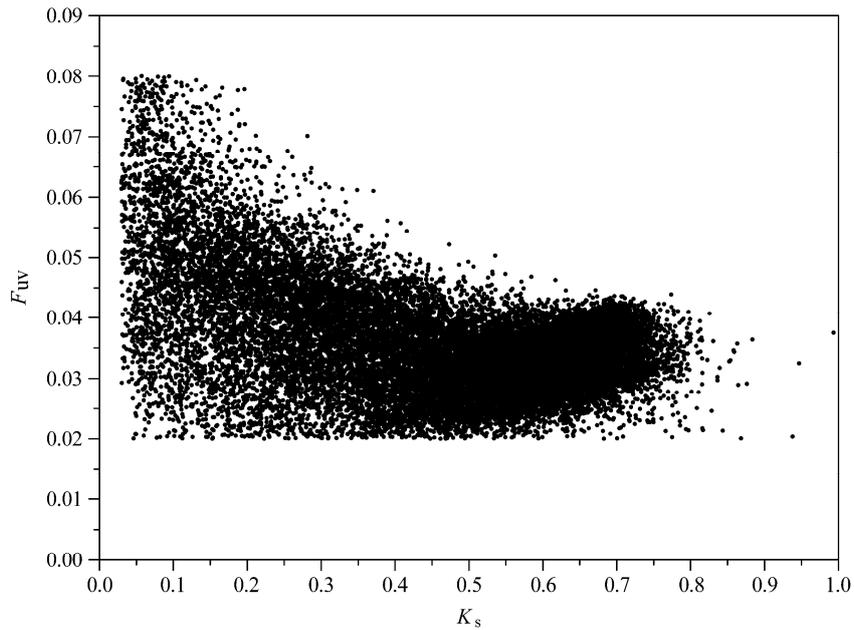


图 5 紫外辐射和总辐射比值与晴空指数 (K_s) 的关系

Fig. 5 Relationship between the ratio of ultraviolet radiation to solar radiation and the clearness index (K_s)

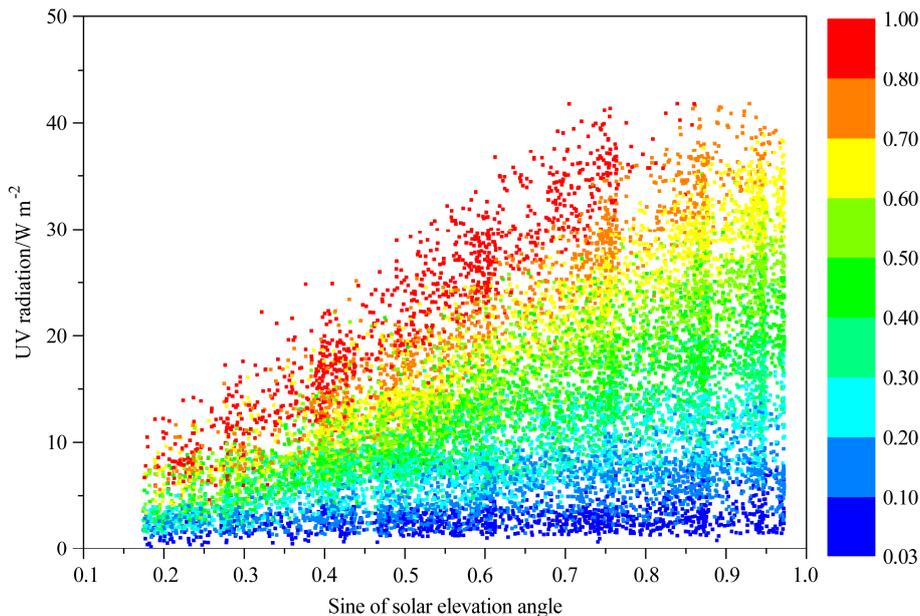


图 6 紫外辐射随太阳高度角正弦值的变化 (不同颜色代表不同的 K_s)

Fig. 6 UV irradiances as function of sine of the solar elevation angle (different K_s values were represented by different colors)

增长, 不同颜色代表不同的 K_s 值, 对于特定的 K_s , 紫外辐射随 μ 以指数形式增长 (Hu et al., 2010), 即

$$R_{uv} = R_{uvm} \times \mu^N, \quad (1)$$

式中, R_{uvm} 表示单位 K_s 区间内紫外辐射最大值, 随机选取 2005~2011 年一半的数据做其与 K_s 的散点图, 如图 7 所示, 满足三次函数关系, 即

$$R_{uvm} = aK_s^3 + bK_s^2 + cK_s + d, \quad (2)$$

紫外辐射按小时累计值的计算公式为

$$R_{uvh} = (aK_s^3 + bK_s^2 + cK_s + d) \times \mu^N, \quad (3)$$

紫外辐射日累计值的计算公式为

$$R_{uvd} = (a\overline{K_s^3} + b\overline{K_s^2} + c\overline{K_s} + d) \times \mu^N \times t_d, \quad (4)$$

其中, t_d 为太阳高度角大于 10° 的小时数, $\overline{K_s}$ 为平均晴空指数 (到达地面的日累计总辐射与日累计天文辐射之比)。代入参数 a, b, c, d, N 的拟合值, 得到紫外辐射日累计值的计算公式

$$R_{uvd} = (0.46748\overline{K_s^3} - 0.4713\overline{K_s^2} + 0.37836\overline{K_s} + 0.00253) \times \mu^{0.8461} \times t_d. \quad (5)$$

把随机选取后剩余的一半数据代入公式 (5) 计算紫外辐射日累计值, 图 8 是计算值与实测值得对比, 平均相对误差为 0.09, 91% 的数据相对误差小于 0.2, 决定系数 R^2 为 0.97, 图中 RMSE 为均方根误差, N_s 为样本数量。根据公式 (5) 计算紫外辐射日累计值的精度较高, 只要能够估测出太阳总辐射即可实现紫外辐射的估测。

3.4 基于温度日较差的紫外辐射估测

公式 (5) 中太阳高度角正弦值 μ 和 t_d 可以通过纬度、经度和日期等计算得到, 只要能够估测出晴空指数 K_s 即可得到紫外辐射的估测。

目前很多学者利用常规气象观测要素建立太阳辐射的估算模型, 其中, 最常用的有日照百分率模型和气温日较差模型。Angstrom (1924) 最先提出太阳辐射的日照百分率模型

$$R_s = R_0 \times (a + bS), \quad (6)$$

式中, S 为日照百分率, a, b 为经验参数。

图 9 为晴空指数的季节变化, 该变化趋势与图 10 中气温日较差 (Δt) 的季节变化趋势一致。根据地表能量平衡, 白天到达地表的太阳辐射较多时, 云量相对较少, 昼夜温差增大 (Almorox et al., 2011), 所以晴空指数与气温日较差的变化趋势一致。Bristow and Campbell (1984) 提出了一个基于气温日较差的太阳辐射估算模型, 该模型认为日总辐射是天文辐射和气温日较差的函数, 即

$$R_s = a_0 R_0 \times [1 - \exp(-a_1(t_{\max} - t_{\min})^{a_2})]. \quad (7)$$

Wu et al. (2007)、叶建圣 (2010)、邓艳君 (2012) 等人比较了两种模型, 发现日照百分率模型的计算值更接近于观测值。但是, 次日的日照百分率估测比较困难, 因此选用气温日较差模型对太阳总辐射进行估测。

到达地面的太阳总辐射与气温日较差、水汽

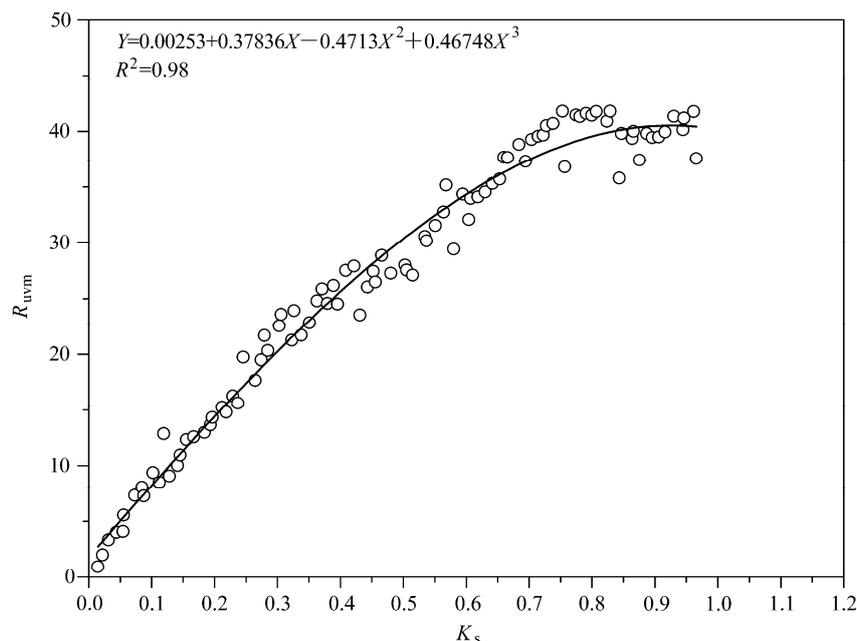


图 7 单位晴空指数区间内紫外辐射最大值 (R_{uvm}) 与晴空指数 K_s 的关系

Fig. 7 The relationship between R_{uvm} (the maximum value of UV radiation per K_s) and K_s at Yucheng station

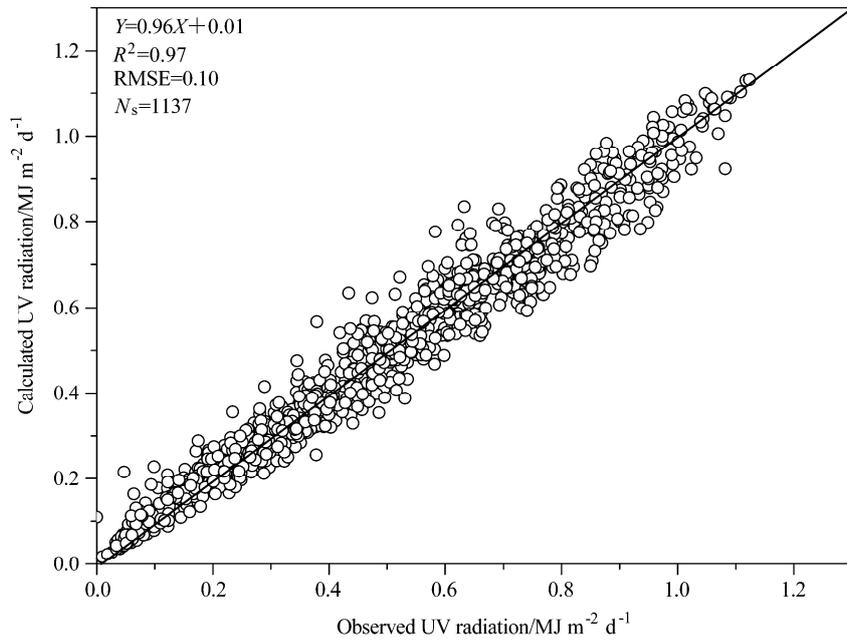


图 8 紫外辐射计算值与实测值的对比

Fig. 8 The comparison of calculated and measured UV radiation, N_s represents the number of samples

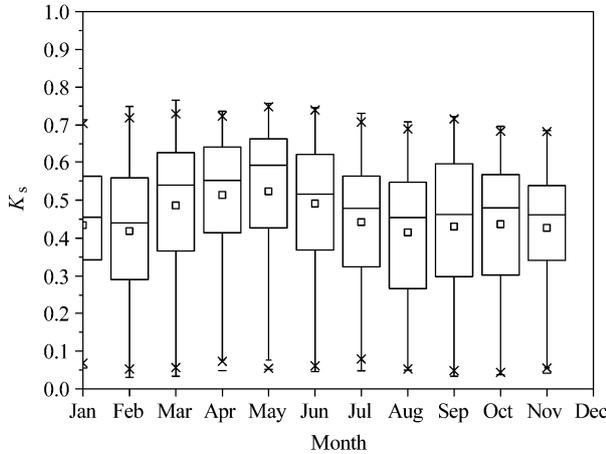


图 9 晴空指数的季节变化

Fig. 9 The seasonal variation of clearness index

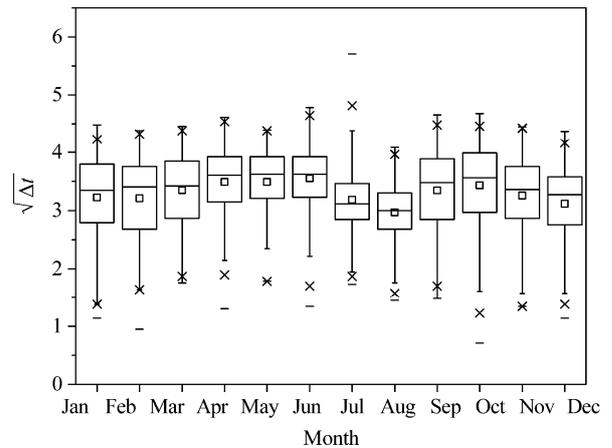


图 10 温度日较差开方 ($\sqrt{\Delta T}$) 的季节变化

Fig. 10 The seasonal variation of the square root of diurnal temperature range ($\sqrt{\Delta T}$)

等相关，很多学者对气温日较差模型进行了改进，Hargreaves et al. (1985)、Hunt et al. (1998)、Wu et al. (2007) 等人提出了改进的气温日较差模型，用 Hunt^a 和 Hunt^b 表示 Hunt et al. (1998) 提出的两种计算方法。

Hargreaves et al. (1985):

$$R_s = a_0 R_0 \times (t_{\max} - t_{\min})^{0.5} + a_1. \quad (8)$$

Hunt^a:

$$R_s = a_0 R_0 \times (t_{\max} - t_{\min})^{0.5} + a_1 t_{\max} + a_2 P + a_3 P^2 + a_4. \quad (9)$$

Hunt^b:

$$R_s = a_0 R_0 \times [1 - \exp(-a_1(t_{\max} - t_{\min})^{0.5}) - a_2(t_{\max} - t_{\min}) - a_3(t_{\max} - t_{\min})^2]. \quad (10)$$

Wu et al. (2007):

$$R_s = R_0 \times [a_0 + a_1(t_{\max} - t_{\min})^{0.5}] + a_2 t_m + a_3 P_t + a_4 T_{dm}. \quad (11)$$

随机选取 2005~2011 年一半数据来拟合(7)~(11) 式, a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 的值如表 3 所示, R_s 为到达地面的太阳总辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), R_0 为到达

大气顶的太阳总辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), t_{\max} 为日最高气温 ($^{\circ}\text{C}$), t_{\min} 为日最低气温 ($^{\circ}\text{C}$), P 为日降水量 (mm), t_m 为日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), T_{dm} 为日平均露点温度 ($^{\circ}\text{C}$), P_t 代表降水量对太阳辐射的影响, 当降雨量大于 0 mm 时, $P_t=1$, 在原公式上加一个常数, 否则 P_t 为 0 。

由于 Wu et al. (2007) 计算的总辐射与实测总辐射的 R^2 最大 (表 3), 且平均相对误差最小, 选取该方法来估测总辐射。

3.5 温度日较差估测紫外辐射的检验

把随机选取后剩余的另一半数据代入 Wu et al. (2007) 的计算公式, 得到总辐射计算值, 与实测值的比较如图 11 所示, R^2 达 0.80 , 平均相对误差为 0.19 , 拟合效果较好。

由计算出来的太阳辐射日总量与天文辐射日总量之比得到平均晴空指数, 代入公式 (5) 估测紫外辐射日总量。图 12 为紫外辐射估测值与实测值的对比, R^2 达到 0.73 , 平均相对误差为 0.22 , 估

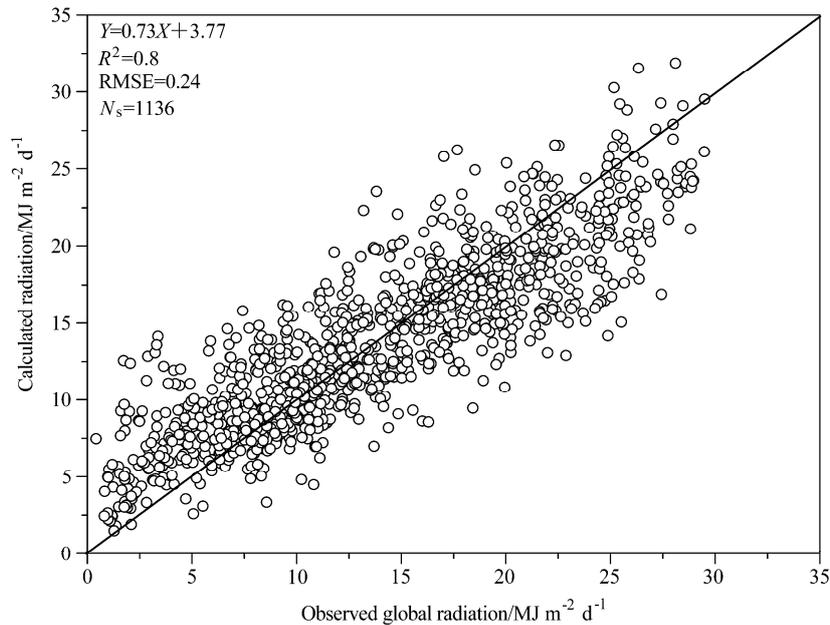


图 11 总辐射计算值与实测值比较
Fig. 11 The comparison of calculated and measured solar radiation

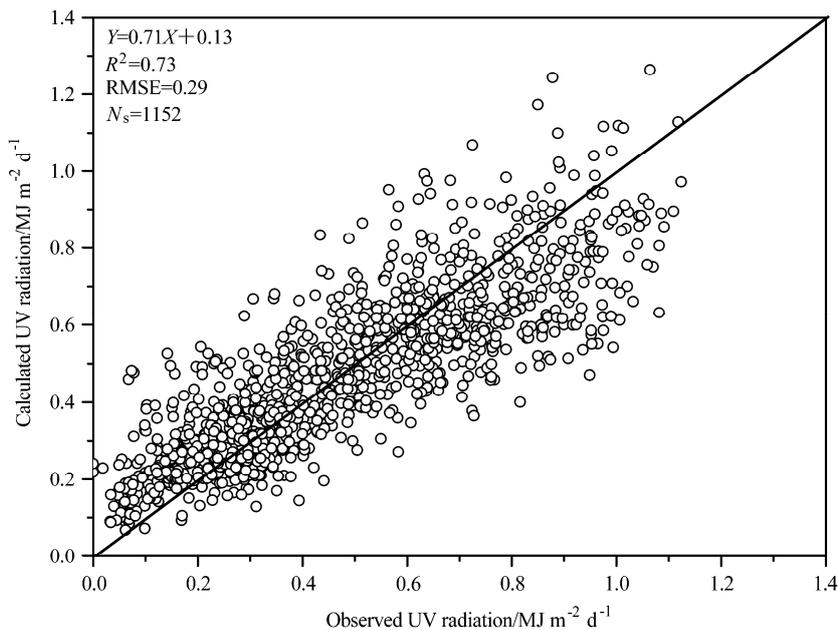


图 12 紫外辐射计算值与实测值的对比
Fig. 12 The comparison of calculated and measured UV radiation

测效果较好。

表 3 计算总辐射的参数

Table 3 The parameters of total radiation calculation

计算方法	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	R^2
Bristow and Campbell (1984)	0.585	0.030	1.649	—	—	0.71
Hargreaves et al. (1985)	0.138	-0.568	—	—	—	0.68
Hunt ^a	0.170	-0.141	-0.403	0.005	-0.734	0.73
Hunt ^b	0.578	-0.014	0.044	0.009	—	0.71
Wu et al. (2007)	-0.014	0.129	0.008	-0.068	-0.009	0.74

以紫外辐射月平均日总量最大值的十分之一作为紫外线指数的一个标准单位(祝青林等, 2005), 并按照中气预发 [2000] 11 号文标准, 对紫外线指数进行等级划分, 有 95% 的紫外线等级估测与实测值相差不大于 1, 估测效果较好。

4 小结

通过禹城站近 7 年观测数据获得了该区域紫外辐射的变化规律, 并建立了利用温度日较差估测紫外辐射的方法, 结论如下:

(1) 紫外辐射与总辐射有一致的年、月、日变化规律, 由于地球公转导致总辐射与紫外辐射都呈冬季小夏季大的季节分布特征, 由于地球自转使得总辐射和紫外辐射都呈早晚小中午大的日变化特点。紫外辐射日累计值基本维持在 $0.1 \sim 1.20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 平均值为 $0.468 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。

(2) 紫外辐射与总辐射的比值范围在 $0.023 \sim 0.046$, 呈夏大冬小的特征, 并且夏季的变化幅度大于冬季, 该比值随晴空指数的增大而减小, 在晴空指数大于 0.5 时比较稳定。

(3) 可以由温度日较差估测总辐射, R^2 达 0.80, 平均相对误差为 0.19, 再由总辐射计算晴空指数 K_s , 结合太阳高度角和可照时数估测紫外辐射日累计值, R^2 达 0.73, 相对均方根误差为 0.22, 估测紫外线等级与实测紫外线等级相差不大于 1 的数据占 95%, 估测效果较好。

(4) 影响到达地面总辐射的因子除了气温、水汽外还有其他很多因子, 本文考虑得不全面, 气温日较差模型准确率需要进一步改进。

致谢 感谢 CERN 网络运行与维护团队的工作, 感谢中国科学院禹城生态系统定位研究站的老师对仪器的维护。

参考文献 (References)

Almorox J, Hontoria C, Benito M. 2011. Models for obtaining daily global

solar radiation with measured air temperature data in Madrid (Spain) [J]. Appl. Energy, 88 (5): 1703–1709.

Angstrom A. 1924. Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc, 50 (210): 121–126.

Bristow K L, Campbell G S. 1984. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature [J]. Agr. Forest Meteor., 31 (2): 159–166.

丛菁, 孙立娟, 蔡冬梅. 2009. 大连市紫外线辐射强度分析和预报方法研究 [J]. 气象与环境学报, 25 (3): 48–52. Cong Jing, Sun Lijuan, Cai Dongmei. 2009. Ultraviolet radiation intensity and its forecast method in Dalian, Liaoning Province [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 25 (3): 48–52.

邓雪娇, 吴兑, 游积平. 2003. 广州市地面太阳紫外线辐射观测和初步分析 [J]. 热带气象学报, 19 (S1): 118–125. Deng Xuejiao, Wu Dui, You Jiping. 2003. The observation of surface solar ultraviolet in Guangzhou and its preliminary analysis [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19 (S1): 118–125.

邓艳君. 2012. 日太阳辐射分布式模型研究 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 81pp. Deng Yanjun. 2012. Distributed modeling of daily solar radiatio [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 81pp.

Diffey B L. 1991. Solar ultraviolet radiation effects on biological systems [J]. Phys. Med. Biol., 36 (3): 299–328.

Feister U, Grasnack K H. 1992. Solar UV radiation measurements at potsdam ($52^{\circ}22'N$, $13^{\circ}5'E$) [J]. Sol. Energy, 49 (6): 541–548.

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.

傅炳珊, 车少静, 陈渭民, 等. 2002. 晴空或少云状况下紫外辐射强度及指数预报模式 [J]. 南京气象学院学报, 25 (3): 321–327. Fu Bingshan, Che Shaojing, Chen Weimin, et al. 2002. Ground-based ultraviolet radiation operational prediction model in clear/part cloudy day [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (3): 321–327.

Geiger M, Diabaté L, Ménard L, et al. 2002. A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation [J]. Sol. Energy, 73 (6): 475–480.

Hargreaves G L, Hargreaves G H, Riley J P. 1985. Irrigation water requirements for Senegal River basin [J]. J. Irrig. Drain. Eng., 111 (3): 265–275.

Hu B, Wang Y S, Liu G R. 2010. Variation characteristics of ultraviolet radiation derived from measurement and reconstruction in Beijing, China [J]. Tellus B., 62 (2): 100–108.

Huang M L, Jiang H, Ju W M, 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]. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 22 (5): 491–506.

Hunt L A, Kuchar L, Swanton C J. 1998. Estimation of solar radiation for use in crop modelling [J]. Agr. Forest. Meteorol., 91 (3–4): 293–300.

江灏, 季国良, 吕兰芝. 1994. HEIFE 绿洲区的太阳紫外辐射 [J]. 高原气象, 13 (3): 346–352. Jiang Hao, Ji Guoliang, Lü Lanzhi. 1994. The

- solar ultraviolet radiation over oasis region in HEIFE [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 13 (3): 346–352.
- 李春. 2003. 拉萨紫外线指数预报方法 [J]. *气象*, 29 (9): 50–53. Li Chun. 2003. Forecast method of ultraviolet index in Lhasa city [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 29 (9): 50–53.
- Lovengreen C, Fuenzalida H, Villanueva L. 2000. Ultraviolet solar radiation at Valdivia, Chile (39. 8°S) [J]. *Atmos. Environ.*, 34 (24): 4051–4061.
- 毛则剑, 张立峰. 2007. 杭州市紫外线辐射强度分析和预报方法研究 [J]. *浙江气象*, 28 (3): 22–26. Mao Zejian, Zhang Lifeng. 2007. Ultraviolet radiation intensity and its forecast method in Hangzhou [J]. *Journal of Zhejiang Meteorology (in Chinese)*, 28 (3): 22–26.
- Omrán M. 2000. Analysis of solar radiation over Egypt [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 67 (3–4): 225–240.
- 曲晓黎, 张彦恒, 赵娜, 等. 2011. 石家庄市紫外线监测分析及预报方法 [J]. *气象科技*, 39 (6): 731–735. Qu Xiaoli, Zhang Yanheng, Zhao Na, et al. 2011. Analysis of ultraviolet ray monitoring data in Shijiazhuang and prediction method [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 39 (6): 731–735.
- Robaa S M. 2004. A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt [J]. *So. Energy*, 77 (2): 251–259.
- Santos J B, Villán D M, Castrillo A M. 2011. Analysis and cloudiness influence on UV total irradiation [J]. *Int. J. Climatol.*, 31 (3): 451–460.
- 沈元芳, 刘洪利, 刘煜, 等. 2009. GRAPES 紫外线(UV)数值预报 [J]. *气象科技*, 37 (6): 697–704. Shen Yuanfang, Liu Hongli, Liu Yu, et al. 2009. GRAPES numerical ultraviolet prediction [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 37 (6): 697–704.
- 王繁强, 宋百春, 周阿舒, 等. 2005. 近地面太阳紫外线辐射强度分析与预报 [J]. *干旱气象*, 23 (2): 30–34. Wang Fanqiang, Song Baichun, Zhou Ashu, et al. 2005. Analysis of ultraviolet radiation near surface and forecast [J]. *Arid Meteorology (in Chinese)*, 23 (2): 30–34.
- 吴兑. 2000. 到达地面的紫外辐射强度预报 [J]. *气象*, 26(12): 38–42. Wu Dui. 2000. Forecast of surface ultraviolet radiation [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 26 (12): 38–42.
- Wu G F, Liu Y L, Wang T J. 2007. Methods and strategy for modeling daily global solar radiation with measured meteorological data—A case study in Nanchang station, China [J]. *Energy Convers. Manage.*, 48 (9): 2447–2452.
- 叶建圣. 2010. 青藏高原植被净初级生产力对气候变化的响应 [D]. 兰州大学博士学位文, 115pp. Ye Jiansheng, 2010. Response of vegetation net primary productivity to climate change on the Tibetan Plateau [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University, 115pp.
- 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. 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.
- 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): 108–113. Zhu Qinglin, Yu Guirui, Cai Fu, et al. 2005. Spatialization research on ultraviolet radiation in China [J]. *Resources Science (in Chinese)*, 27 (1): 108–113.