

南京地区紫外辐射初步研究

郑有飞¹, 石广玉², 何金海³, 柯耀文¹

(1. 南京气象学院 环境科学系, 江苏 南京 210044; 2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;

3. 南京气象学院 大气科学系, 江苏 南京 210044)

摘要:采用简化型辐射传输模型计算了南京地区到达地表的太阳紫外辐射(UV 辐射),同时根据地面紫外辐射的观测资料分析了南京地区紫外辐射的年变化、晴天与阴天的变化规律及与太阳总辐射的关系。

关键词:紫外辐射量;辐射传输;太阳辐射;观测;计算

中图分类号: P422.62 **文献标识码:** A

大气臭氧主要分布在平流层,极大值在 20~25 km 附近。平流层 O₃ 可强烈吸收太阳紫外辐射。近年来由于人类活动的影响,大气臭氧层受到破坏,其中南极地区 O₃ 量竟减少了 40%~50%,出现了所谓“臭氧洞”,引起了人们的极大关注^[1]。臭氧减少的后果之一便是到达地表的紫外辐射量将增加,尤其是 UV-B 辐射量增加更多,将对人类生产和生活及生存环境产生深远影响^[2]。因此,臭氧层变化引起的紫外辐射量变化一直是人们研究之重点,但到目前才开始进行系统的研究,研究主要在观测和计算两个方面进行。

观测主要是地面仪器观测,少数通过卫星资料反演获取。由于观测仪器和观测标准的不规范性,以及观测误差,一般认为,以地面器测手段获取长期而精确的地表紫外辐射资料是相当困难的。

近年来,紫外辐射观测的质量和数量已大大提高,不同仪器测值的差异逐步减少到 5%左右,但其长期变化的获取仍无法解决,几乎没有历史数据可用来作为本底的估计(Caldwell, 1995)。再加上研究紫外辐射要求有高精度和高稳定性的数据,使得难度加大。于是人们纷纷采用计算方法来研究紫外辐射的变化。

计算方法目前有两类:统计学(经验)模型与辐射传输方程。统计学方法较简便,但无明确的物理学意义。辐射传输方程从紫外辐射在大气中传输的物理机理出发,易于为人们所接受,目前国际上许多研究均采用 DISORT 法(discrete-ordinate-method, 离散坐标方法)。但受目前大气物理研究水平的限制,许多资料难以取得,而且对计算机的要求高,在实际研究工作中难度很大。因此寻求一个物理意义明确、计算方法简单、计算结果可信的计算方法非常必要。本文正是在这方面作的初步探讨。

本文首先利用辐射传输方程计算到达地表的直接紫外辐射和散射紫外辐射,并与实测地表紫外辐射量(包括直接辐射与散射辐射)进行了比较,对南京地区紫外辐射进行了初步研究。

此外,还对实测资料进行了分析。

1 简化型紫外辐射传输模式

太阳辐射穿越地球大气层时受到很大的削弱,其中紫外辐射主要受到3种因素的削弱:1)空气分子的 Rayleigh 散射;2)臭氧(O₃)的吸收;3)气溶胶粒子的散射与吸收^[3]。

1.1 模式介绍

1.1.1 直接紫外辐射^[4]

到达地表的波长为 λ (μm) 的直接紫外辐射量为

$$E_i = E_{0i} \tau_i \tau_{O_3} \tau_{ai} \quad (1)$$

总的直接紫外辐射量为

$$E = \left(\sum_{i=1}^N E_i \Delta\lambda \right) \cos\theta_z \quad (2)$$

E_{0i} 为地球大气层外太阳辐射能, $\Delta\lambda$ 为光谱间隔(表1)。 τ_i 、 τ_{O_3} 、 τ_{ai} 分别为 Rayleigh 散射、臭氧吸收和气溶胶消光的光谱传输函数, θ_z 为太阳天顶角。

表1 大气层顶部太阳能数据^[4]

Table 1 Extraterrestrial solar spectral irradiance

波长(μm)	0.280	0.285	0.290	0.295	0.300	0.305	0.310	0.315
$E_{\alpha}(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	162.50	286.25	535.00	560.00	527.50	557.50	602.51	705.00
波长(μm)	0.325	0.330	0.335	0.340	0.345	0.350	0.355	0.360
$E_{\alpha}(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	782.50	997.50	906.25	960.00	877.50	955.00	1 044.99	940.00
波长(μm)	0.365	0.370	0.375	0.380	0.385	0.390	0.395	0.400
$E_{\alpha}(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	1 125.01	1 165.00	1 081.25	1 210.00	931.25	1 200.00	1 033.74	1 702.49

(1) Rayleigh 散射 Rayleigh 散射的光谱传输函数为^[5]

$$\tau_r = \exp(-0.008735\lambda^{-4.08} m_r p/p_0) \quad (3)$$

其中, $p_0 = 1013.25 \text{ hPa}$, p 为地表实际气压。 m_r 为空气相对光学质量^[4]

$$m_r = [\cos\theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \quad (4)$$

根据地面观测,直到太阳天顶角达86°时,该公式的误差仍小于0.1%,当 $\theta_z = 89.5^\circ$ 时,误差最大为1.25%。观测表明,该公式较适用于中低纬度地区,在高纬地区误差略大。 m_r/p_0 为当地条件下的空气相对光学质量,定义为

$$m_a = m_r/p_0 \quad (5)$$

(2) 臭氧吸收 臭氧吸收的光谱传输函数为^[5]

$$\tau_{O_3} = \exp[-k(\lambda) l_{O_3} m_0] \quad (6)$$

其中, $k(\lambda)$ 为臭氧吸收系数(表2)。 l_{O_3} 为臭氧量(单位 cm), m_0 为臭氧相对光学质量^[4]

$$m_0 = (1 + z_3/r_e) [\cos^2\theta_z + 2(z_3/r_e)]^{-1/2} \quad (7)$$

其中, z_3 为臭氧峰值高度,该公式假定了大气臭氧层集中在 z_3 处。SAGE(Stratospheric Aerosological Gas Experiments)资料显示,南京地区一般在20~30 km。 r_e 为地球半径,取为6370 km。在实际计算时,人们常用 m_r 来代替 m_0 ^[4]。

表 2 臭氧吸收系数 $k^{[4]}$

Table 2 Spectral absorption coefficient by ozone

波长(μm)	0.290	0.295	0.300	0.305	0.310	0.315	0.320	0.325
k	38.000	20.000	10.000	4.800	2.700	1.350	0.800	0.380
波长(μm)	0.330	0.335	0.340	0.345	0.350	0.355	0.360	
k	0.160	0.075	0.040	0.019	0.007	0.000		

(3) 气溶胶减弱 气溶胶的浓度、成分、形状和大小随时间的长时、大范围变化使得建立气溶胶模式所需平均状况资料很难获得。气溶胶削弱的光谱传输函数可简单表示为

$$\tau_a = \exp(\beta \lambda^{-\alpha} m_a). \quad (8)$$

α 为波长指数, $0.8 < \alpha < 2.0$, 通常取 $\alpha = 1.3$ 。在纬度为 30° 附近地区, $0.047 < \beta < 0.375$ 。根据南京地区实际大气状况, 浑浊度系数 β 取 $\beta = 0.30^{[4,5]}$ 。

1.1.2 晴天散射辐射

根据 Curchis 的分析^[6], 直接太阳辐射的计算是一个相对简单的问题, 而包含太阳吸收段散射在内的散射辐射的计算则较难, 直到 1966 年才由 Dave 和 Furukawa 解决^[7,8]。到达地表的晴天整个天空的散射辐射(D)可以表示为

$$D = f \Delta E \cos \theta_s. \quad (9)$$

其中

$$\Delta E = \sum_{i=1}^N (E_{0i} \tau_{0z_i} - E_i) \Delta \lambda_i. \quad (10)$$

$f = 0.5$, 表示非反射地面纯 Rayleigh 大气散射辐射值, 反映了分子散射和气溶胶散射, 但气溶胶吸收被忽略了。由于气溶胶散射和 Rayleigh 散射的散射函数不同, 很难说系数 f 独立于波长, 但考虑到 Rayleigh 散射的影响大, 系数 f 可以被假定为独立于波长。

1.2 模式计算结果

利用上述模式可计算得到南京地区紫外辐射(取波长为 $0.29 \sim 0.40 \mu\text{m}$)量。模式中输入量有 p 、 θ_z (或 $\cos \theta_z$)、 l_{oz} 、 z_3 等。在日变化计算中, 根据实测资料, 取 $p = 1009.9 \text{ hPa}$ (p 取自南京气象学院农业气象试验站气象观测资料, 下同), $l_{oz} = 0.36 \text{ cm}$, $z_3 = 26.986 \text{ km}$ (l_{oz} 、 z_3 为南京地区臭氧资料, 取自 TOMS (Total Ozone Mapping System) 和 SAGE 资料, 下同)。计算结果见表 3, 它反映了南京地区紫外辐射的日变化基本规律, 可作为研究紫外辐射的基本材料。

1.3 南京地区 O_3 减少引起紫外辐射增加量实验证据表明, 地表紫外辐射的增加直

表 3 紫外辐射日变化模式计算值

Table 3 Calculations from the simplified UV model on an hour basis

观测时刻	直接紫外辐射(W/m^2)	散射紫外辐射(W/m^2)	总紫外辐射(W/m^2)
6:00	0.004 2	0.000 99	0.005 1
7:00	0.479 5	0.120 2	0.600 6
8:00	2.658	0.636	3.293
9:00	6.310	1.612	7.923
10:00	10.199 6	2.846	13.045
11:00	13.111	4.333	17.444
12:00	14.232	5.008	19.239 9
13:00	13.275	4.896	18.172
14:00	10.492	4.968	15.459 5
15:00	6.641	2.830	9.472
16:00	2.918	1.309	4.227
17:00	0.587	0.237	0.822
18:00	0.008 3	0.003 6	0.011 9

接与大气臭氧减少有关,在全年固定太阳天顶角(θ_z)无云无污染情况下的观测证明了臭氧与红斑紫外辐射有非常好的反相关性^[9]。人们通常采用辐射(光)放大系数(RAF, Radiation Amplification Factor)分析臭氧变化对紫外辐射变化的作用,它定义为臭氧总量每减少1%,地面UV辐射增加的百分数。RAF是评价未来臭氧减少对人类影响的重要依据^[9]。根据模式计算不同太阳天顶角条件下臭氧减少5%、10%、15%、20%时直接紫外辐射(0.29~0.32 μm)增加百分率结果见表4。计算中, p 、 z_3 、 l_{O_3} 分别为1992年南京地区平均值。

表4 南京地区臭氧减少引起UV-B增加百分率

Table 4 UV-B radiation increase percentage coming from reduced ozone over Nanjing %

O ₃ 变化量(%)	θ_z (°)				
	20	35	45	60	75
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-5	0.019	3.860	2.980	2.960	2.940
-10	0.058	7.980	6.198	5.740	6.020
-15	0.097	12.330	9.660	9.560	9.300
-20	0.110	16.960	13.310	13.120	12.730

注: l_{O_3} 是0.305 μm 时的测值

显然,南京地区UV-B波段的直接紫外辐射的RAF不到1。若考虑散射辐射,则RAF会增加,约为1^[2],与国外研究者用宽波段仪器(光谱仪)实测的RAF=1.07±0.15(或1.25±0.2)结果^[9]基本一致。

2 地表紫外辐射观测与结果分析

2.1 观测仪器介绍

1) 美国EPPLEY实验仪器公司生产的UV-A、B(波长为0.295~0.385 μm)TUVR型紫外传感器,该传感器在自然光条件下输出电压为0~10 mV,转换系数为 $K_1=0.352 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{mV}^{-1}$ 。2) 国产DFY2天空辐射表,波长范围为0.3~2.4 μm ,输出电压为0~10 mV,转换系数为 $L=11.42 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{mV}^{-1}$ 。

2.2 观测方法及项目

观测时间一般选择在正点前后各一分钟,若有云即将遮住太阳或太阳即将露出云层,即云通过太阳下方前后,测值可能出现不稳定时,推迟或提前观测。

(1) 年变化观测 于1998年7月至1999年6月在南京气象学院农业气象试验站选择了一些全晴无云或有云天气进行了紫外辐射和天空总辐射的观测,对结果进行了分析。

(2) 全晴无云天日变化观测 每个观测日连续观测紫外总辐射(直接、散射辐射之和)和天空总辐射。一般从08时观测到16时,观测间隔为1h或2h,有时从05时观测到18时。绘成日变曲线。

(3) 全阴天(5月31日)日变化观测 选择全阴天气,连续观测紫外总辐射(直接、散射辐射之和)和天空总辐射,绘成日变曲线。

观测发现,紫外辐射仪的脉动很大,天空总辐射表相对稳定,因此观测的程序是:开机 稳定 读紫外辐射表 读总辐射表 读紫外辐射表 平均两次紫外辐射测值。

2.3 观测结果简介

(1) 年变化 一年观测资料经整理后,选择有代表性的观测资料,提取一天中辐射值最大

时刻(正午 12 时)的紫外辐射和天空辐射值, 绘成紫外辐射和天空总辐射的年变化曲线(图 1、图 2)。可以看出, 紫外辐射与天空总辐射年变规律相似, 但在进入初夏后, 紫外辐射与天空总辐射的变化形式存在差异, 紫外辐射曲线的波动大, 而总辐射的波动小, 两者的差值在 6 月下旬最大, 说明长期的紫外辐射变化不仅仅决定于天空总辐射。12 月下旬两者差值最小, 与太阳天顶角余弦值变化趋势相同。紫外辐射和天空总辐射比值在 0.020 左右。

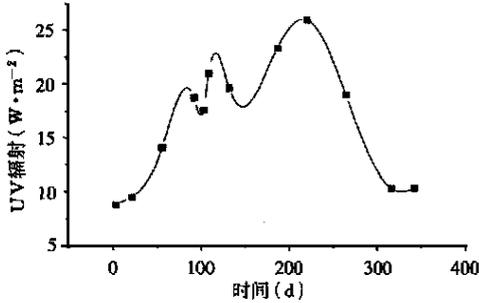


图 1 南京地区紫外辐射的年变化

Fig. 1 Annual variation of UVR in Nanjing

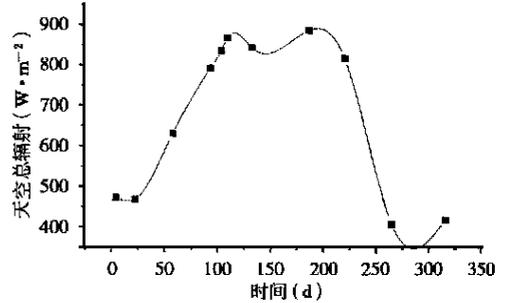


图 2 南京地区天空总辐射的年变化

Fig. 2 Annual variation of total solar radiation in Nanjing

(2) 全晴无云天日变化 1999 年 5 月 13 日(全晴无云天)在南京气象学院农业气象试验站连续观测紫外总辐射(直接、散射辐射之和)和天空总辐射, 绘成日变曲线(图 3、图 4、图 5、图 6)。可以看出, 1) 紫外辐射与总辐变化规律相似, 近似于正弦曲线, 早晚接近于零; 中午大, 正午最大, 说明紫外辐射的日变化取决于总辐射的值; 2) 总辐射中紫外辐射所占百分比早晨、傍晚偏小, 而正午最大, 与太阳天顶角余弦值变化趋势基本一致。

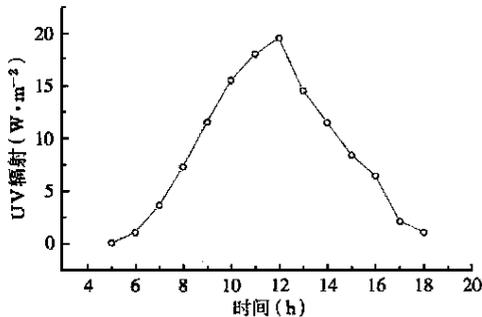


图 3 南京地区晴天太阳紫外辐射日变化

Fig. 3 Daily change of UVR on the fine day in Nanjing

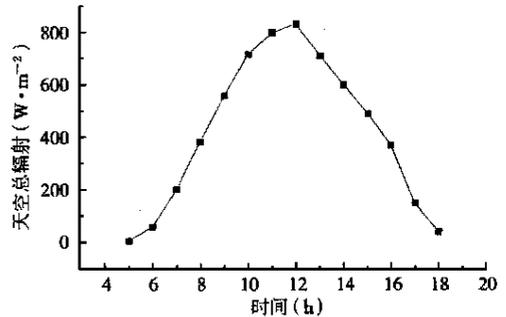


图 4 南京地区晴天太阳总辐射日变化

Fig. 4 Daily change of total solar radiation on the fine day in Nanjing

(3) 全阴天日变化 全阴天(1999 年 5 月 31 日)紫外辐射、总辐射日变化与晴天不同, 并无明显规律。图 5 和 6 只能表示这一天的变化状况。其变化原因可能是因为 5 月 31 日这一天为满天浓云, 早晨有烟雾, 傍晚有零星雨, 天气条件不稳定, 有云量增减、烟雾和水汽的凝聚与消散等, 表明云、气溶胶等对辐射传输的强烈影响。从图上可看出紫外辐射与天空总辐射日变化规律基本一致, 进一步说明紫外辐射与总辐射存在着一定的依赖关系。

进一步计算得出紫外辐射在总辐射中所占百分比的日变化, 同时给出了太阳天顶角余弦值的日变化, 发现有如下规律: 与全晴天相比, 全阴天紫外辐射在总辐射中所占的百分比也是

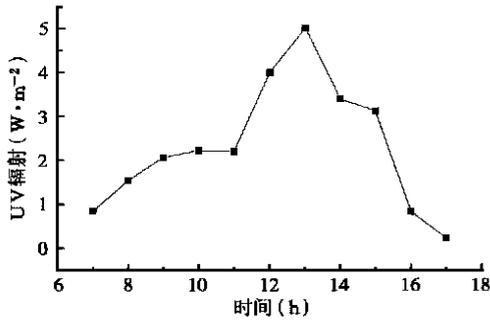


图 5 南京地区阴天紫外辐射日变化

Fig. 5 Daily change of UVR on the overcast day in Nanjing

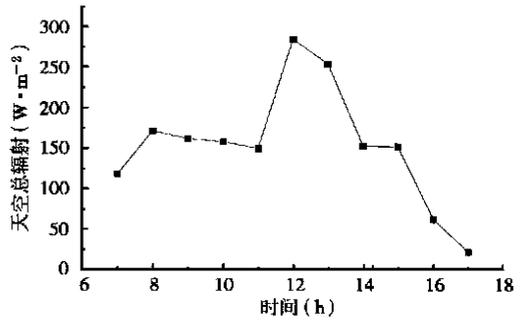


图 6 南京地区阴天总辐射日变化

Fig. 6 Daily change of total solar radiation on the overcast day in Nanjing

早晚最小,但峰值明显在午后,落后于太阳天顶角余弦值峰值;同时,此百分比与晴天相比略大,表明紫外辐射对云的穿透率比总辐射大。

3 观测与计算结果比较

任选一年中 4 个季节的 4 个晴天,计算了全天各正点时的紫外辐射量及计算值与观测值的相对差值(表 5),发现计算值与观测值有一定的差异,早晚差值较大,而中午前后差值较小,应该说这样的效果是较好的。

表 5 计算值与观测值的差值

Table 5 Relative error of calculations to observations

全天平均(06~18时)	上、下午(09~15时)	正午前后(11~13时)
0.283	0.090	0.0523

从 4 天中选择一个晴日,绘制了紫外辐射量计算值和观测值的日变化图(图 7)发现,计算结果与观测结果比较相近,变化趋势一致。午后 13 时,观测值曲线变形,曲线内凹,估计是因为午后天空有人眼难以观测到的薄云。

4 讨论

根据文献[9]分析,地表紫外辐射的观测和计算目前还是一个难点。人们大多用较为复杂的模型(如 DISORT: discrete-ordinate-method 离散坐标方法)或经验方法进行计算,而对观测方法持批评态度^[9],因此人们一直在探索一个精确、可行的方法。本文采用较为简单的辐射传输模式和观测方法,试图在这方面作一探讨。

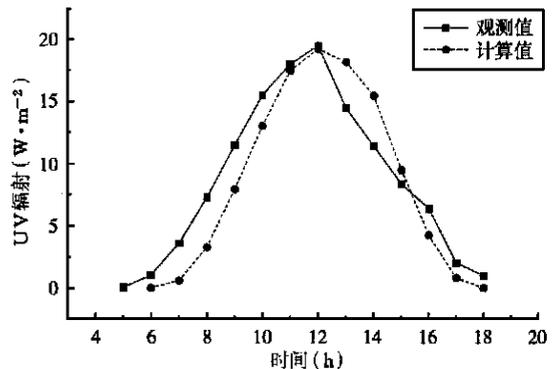


图 7 计算与观测的紫外辐射的日变化(1999-05-13)

Fig. 7 A comparison between estimations and observations of UVR (May 13, 1999)

参 考 文 献

- [1] 周秀骥主编. 高等大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- [2] 王春乙, 郭建平, 郑有飞. 二氧化碳、臭氧、紫外辐射与农作物生产[M]. 北京: 气象出版社, 1997.
- [3] 刘长盛, 刘文保. 大气辐射学[M]. 南京: 南京大学出版社, 1990.
- [4] Iqbal M. An Introduction to Solar Radiation. New York: Academic Press, 1983.
- [5] Leckner B O. The spectral distribution of solar radiation at the earth's space-elements of a model[J]. Solar Energy, 1978, 20: 143 ~ 150.
- [6] Cutchis P. Stratospheric ozone depletion and solar ultraviolet radiation on earth[J]. Science, 1974, 184(4132): 13 ~ 19.
- [7] Dave J V, Furukwa P M. Scattered radiation in ozone absorption bands at selected levels of a terrestrial Rayleigh atmosphere[J]. Meteor Monogr, 1966, 7(29): 321 ~ 353.
- [8] Dave J V, Halpern P. Effect of changes in ozone amount on the ultraviolet radiation received at sea level of a model atmosphere[J]. Atmospheric Environment, 1976, 10: 547 ~ 555.
- [9] WMO. Scientific assessment of ozone depletion: 1998[R]. Global ozone research and monitoring project report No. 44. 1999.

A Preliminary Study of UV Radiation over Nanjing Area

Zheng Youfei¹⁾ Shi Guangyu²⁾ He Jinhai³⁾ Ke Yaowen¹⁾

(1) Department of Environmental Sciences, NIM, Nanjing 210044;

2) Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029;

3) Department of Atmospheric Sciences, NIM, Nanjing 210044)

Abstract: A simplified transmission model is used to estimate surface ultraviolet (UV) radiation over Nanjing area. Taking account of possible ozone variation in the future time, the value of UV radiation amplification factor (RAF) is obtained. Additionally, annual variations of UV, its relations to total solar radiation and weather conditions are investigated by virtue of one-year UV observations.

Key words: UV radiation, radiation transmission, solar radiation, observation, estimation