

文章编号: 1000-2022(2002) 03-0321-07

晴空或少云状况下紫外辐射强度及指数预报模式

傅炳珊¹, 车少静¹, 陈渭民², 马翠平³

(1. 石家庄市气象局, 河北 石家庄 050081; 2. 南京气象学院 电子工程系, 江苏 南京 210044;

3. 河北省气象局, 河北 石家庄 050021)

摘 要: 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, 应用可测得的实际大气物理参数, 建立晴空或少云天气状况下石家庄市紫外波段(280 ~ 400 nm) 辐射强度及指数预报模式, 考虑了臭氧的两个吸收带。晴空条件下的散射主要考虑了分子和气溶胶的多次散射, 少云时还考虑了云对紫外辐射的影响。其中多次散射的计算采用了离散坐标法。且对由于臭氧实时资料的短缺造成的误差进行了系统订正, 并将订正结果与实况资料进行了对比。结果表明, 由模式客观预报紫外辐射强度是可行的。

关键词: 晴空少云; 紫外线辐射强度预报; 紫外线辐射指数预报; 臭氧; 系统订正

中图分类号: P422.62 **文献标识码:** A

近十多年来, 人们过度接受紫外线的辐射, 皮肤黑瘤、非黑瘤皮肤癌及白内障的病例数量激增, 全世界 53 % 的失明是由白内障引起的^[1]。面对过度的紫外线辐射造成的严重后果, 有关国际组织和许多国家政府要求采取有效措施以减少过度紫外辐射的危害。中国气象局明文规定从 2000 年 5 月 1 日起, 各省市局要对紫外辐射强度做规范化的预报。天气状况决定了紫外线的辐射强度。有云的天气下, 云对紫外线的衰减起决定作用。由于不同种类不同高度的云对辐射的吸收、散射和反射有很大差别, 加之云的类别十分复杂, 所以本文主要研究晴空少云情况下的太阳紫外辐射。对某一特定地区特定时间来说, 晴空少云状况下影响到达地表的紫外辐射量的主要因素有: 臭氧、地表面的反射率、对流层的气溶胶、云。确定到达地面的紫外辐射量, 国际上采用两种办法: 一种是地面仪器测量; 另一种是辐射传输模式推算法。预报手段分统计和模式计算两种。国内对紫外辐射的研究包括紫外辐射的卫星遥感测量、地面观测等, 王普才等^[2-3]探讨了对地面紫外辐射的影响因素, 指出臭氧总量、臭氧的垂直分布在一定程度上影响到达地面的紫外辐射。并将紫外辐射光谱辐照度的模式计算结果与实测值进行了比较。结果表明, 地面紫外辐射水平也可以利用其它大气观测资料通过模式计算间接得到。

本文根据大气辐射传输理论, 在中分辨率大气辐射传输模式的基础上, 应用各种可测得的

收稿日期: 2001-09-30; 改回日期: 2001-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 40175007

第一作者简介: 傅炳珊(1967-), 女, 河北正定人, 工程师, 硕士, 主要从事天气预报工作, 研究方向之一为光谱太阳辐射的计算。

实际大气物理参数,建立石家庄市晴空或少云天气状况下紫外波段(280~400 nm)辐射强度预报模式。考虑到目前日常业务中,难以得到臭氧的实时廓线,故此模式计算时采用美国标准大气的臭氧资料,然后对由于臭氧资料的短缺造成的误差进行系统订正。预报实效是上午 10 时前做出当天紫外线强度及指数预报,并将模式计算结果与实况资料进行了对比。

1 影响大气紫外辐射传输的因子

1.1 主要吸收气体——臭氧

大气中臭氧主要分布在 10~50 km 高度层,极大值在 20~25 km 高度层,对流层的臭氧只占整层大气臭氧量的十分之一以下。而且臭氧总量有明显的地区变化和季节变化。其范围从 200~450 Du,当臭氧洞出现时,臭氧总量可能更少。臭氧在紫外波段有两个明显的吸收带,1) 0.2~0.3 m 的 Hartley(哈特利)吸收带;2) 0.3~0.6 m 的 Huggins(赫金斯)带。

对于臭氧紫外波段(0.2~0.4 m)的吸收带,Lacis 等^[4]提出的太阳辐射吸收百分率的经验解析表达式为

$$A_{\text{o}_3}^{\text{UV}}(x) = \frac{1.082x}{(1 + 138.6)^{0.805}} + \frac{0.0658}{(1 + 103.6x)^3}。$$

(1)

式中 x 是臭氧含量。

1.2 主要散射粒子——分子和气溶胶

除了吸收气体外,大气中还有一些悬浮粒子,对辐射造成散射和衰减,主要有空气分子、气溶胶和云雨滴^[5](表 1)。

大气分子的尺度均一,其密度可由气压和温度计算。而气溶胶的尺度和时空变化很大,其辐射效应成为辐射传输计算中的难题。

1.2.1 分子的散射

分子散射随波长的增加而急剧减小,总的垂直光学厚度从紫外处接近于 1 后随波长增加而迅速减小,分子散射用到的衰减系数采用了如下计算公式,模式中衰减系数储存在变量 $ABS(6)$ 中^[6]

$$ABS(6) = \frac{1}{(9.26799 \times 10^{18} - 1.07123 \times 10^9)^2}。$$

(2)

其中, λ 是波数,单位为 cm^{-1} 。

1.2.2 气溶胶的散射

气溶胶是指悬浮在空气中的尺度不同的小粒子。其范围为 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ m。气溶胶可分为吸湿性气溶胶和非吸湿性气溶胶两种,主要来源是自然过程带入,如扬尘、风暴、火山爆发、大气的尘埃、流星残余物质、人类活动及海洋上空的海浪泡沫破碎、植物分泌、燃烧、光化反应等。

气溶胶数浓度随高度增加而迅速递减,5 km 以上变化平缓,而且海陆差异基本消失。但气溶胶的数密度不易测准,得到大范围的气溶胶的时空分布也是不可能的,而能见度较易测量和比较。Middleton^[7]求得能见度和消光系数的关系为

$$V_m = \frac{3.912}{e}。$$

(3)

表 1 大气中对太阳辐射有散射作用的粒子

Table 1 Density and size of atmospheric scattering particles

粒子类型	半径/ m	浓度/(个/cm ³)
空气分子	10 ⁻⁴	10 ⁹
爱根核	10 ⁻³ ~10 ⁻²	10 ⁻² ~10 ⁻⁴
霾	10 ⁻² ~1	10 ³ ~10
雾滴	1~10	100~10
云滴	1~10	300~10
雨滴	10 ² ~10 ⁴	10 ⁻² ~10 ⁻⁵

其中, V_m 为能见度, e 为消光系数。由此可见, 严格按气象能见度定义观测得到的能见度 V_m 仅与大气水平消光系数有关。且可用人眼最敏感的绿光($\lambda = 0.55\text{ }\mu\text{m}$) 的消光系数代替, 当用其他波长时应作相应的订正:

$$V_m = \frac{3.912}{e^{0.55}} \left(\frac{\lambda}{0.55} \right)^q。$$

(4)

其中 λ 为波长, q 为波长修正因子, $V_m < 6\text{ km}$, $q = 0.585$; 中等能见度时, $q = 1.3$; 能见度好时, $q = 1.6$ 。

1.3 云参数

少云情况下, 即云量小于 3 成时, 近似采用高层云模式计算, 云滴的分布表示为 $n(r)$ 分布:

$$\frac{dN}{dr} = n(r) = ar \exp(-br)。$$

(5)

其中 a 、 b 和 N_0^* 均为定义云滴分布的参数。表 2 给出了高层云的云参数取值及相关参数范围^[3], 其中, N_0^* 为云滴数密度, W 为冰水含量, R_N 、 R_M 分别为数分布、质量分布的模半径。

表 2 高层云的云参数取值及相关参数

Table 2 Parameters for altostratus cloud size distribution model

b		a	N_0^*/cm^{-3}	$W/\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$R_N/\text{ }\mu\text{m}$	$R_M/\text{ }\mu\text{m}$
5	1.111	6.268	400	0.41	4.5	7.2

2 紫外波段太阳辐射的计算与分析

本文所用资料为: 2000 年 5 月至 7 月石家庄市紫外线观测值; 北京、太原、邢台的探空资料; 石家庄市地面观测资料。

2.1 中分辨率大气辐射传输模式(MODTRAN3)

随着与大气辐射传输有关的应用需求的快速增长, 国内外已发展了多种大气辐射传输模式与算法。LOWTRAN 是“低谱分辨率大气透过率计算程序”, 主要应用于军事和遥感。LOWTRAN7 版本增加了多次散射的计算及新的带模式、臭氧和氧气在紫外波段的吸收参数。考虑了连续吸收、分子、气溶胶、云、雨的散射和吸收、地球曲率及折射对路径及总吸收物质含量计算的影响^[7]。MODTRAN 是中分辨率大气辐射传输模式, 其目的在于改进 LOWTRAN 的光谱分辨率。它将光谱的半高全宽度(FWHM, full width half maximum)由 LOWTRAN 的 20 cm^{-1} 减少到 2 cm^{-1} 。MODTRAN3^[6]与 LOWTRAN7 版本类似, 但加入了一些新参数, 主要为了控制: (1) 是否采用离散坐标算法; (2) 新的带—可选的三角光滑函数的高分辨率太阳光谱辐照度; (3) 对 CO_2 混合比的“步”更新, 其精度已得到许多外国专家的检验。

模式 MODTRAN3 包含了 6 种大气的臭氧垂直廓线, 本文考虑到实时的臭氧垂直廓线目前还得不到, 所以计算时采用其中美国夏季标准大气的臭氧垂直廓线。MODTRAN3 还给出了 9 种大气气溶胶的消光系数^[8], 计算时边界层(0~2 km)采用“城市消光”类型, 对流层(2~10 km)和平流层(10~30 km)气溶胶廓线的季节特点取为“春—夏”型, 平流层气溶胶的高度廓线和消光类型以及平流层之上至 100 km 里的过渡廓线选取“背景平流层廓线和消光系数”。多次散射采用了离散坐标法 16 流近似计算。非对称因子晴空时取为 0.75, 少云时取 0.90。气溶胶使用 Henyey 与 Greenstein 提出的 H-G 相函数近似式^[6]。另外, MODTRAN3 给出了各种地表特性的光谱反照率, 包括雪、森林、农地、沙漠、海洋、云盖和 4 种草地, 本文计算

时采用“农地”的光谱反照率。

2.2 石家庄市紫外辐射强度的分析

石家庄太阳紫外辐射的年变化、日变化均很大, 每年 5—9 月是紫外线最强时期, 6 月达最大。图 1 给出了石家庄市 6 月晴空少云状况下紫外辐射的平均日变化。图中可以看出, 10—15 h 为一天中紫外辐射峰值区, 业务要求预报的紫外线强度即指 10—15 h 的紫外辐射强度。紫外线指数是基于到达地面上的紫外线辐射量确定的, 取值范围为 0~15。据资料统计, 10—15 h 云量大于 5 成时紫外线指数基本减弱到 5 以下, 等级为 2 级(弱)。故本文只计算云量小于等于 5 成的紫外线强度。

2.3 紫外线强度及指数预报

首先人工判断当天中午前后云量是否小于等于 5 成, 若是, 则进行模式运算。上午 10 h 前读取当日 08 h 的北京、太原、邢台的探空曲线(因为石家庄市没有探空站), 将上述 3 个站的探空资料线性内插作为石家庄大气的温、压、湿垂直廓线, 并且做云量的 0、1 判断。云量小于等于 3 成时, 云量判别为 0; 云量大于 3 成同时小于等于 5 成时, 云量判别为 1。将上述资料输入模式, 计算出当日 12 h 石家庄市地面接收的紫外辐射强度, 并转换成指数, 转换公式为

$$\text{紫外线指数} = (\text{辐射强度} - 150) / 100。 \quad (6)$$

等级划分标准采用国家气象局下传文件中的标准。当云量判别为 1 时, 近似选择高层云模式; 为 0 时, 近似采用晴空模式运算。到达地面的太阳紫外辐射包括太阳直接辐射和向下散射辐射。

图 2 给出了 MODTRAN 3 输出的石家庄市 2000-06-10T 12(晴天) 的紫外波段太阳辐射光谱图。由图 2b 可以看出, 晴空时太阳直接辐射随高度降低是逐渐降低的, 与太阳常数(图 2a)相比, 在 280~300 nm 波段存在明显的臭氧吸收带, 由于臭氧层高度较高, 此波段 100 hPa 层上太阳直接辐射已有明显衰减; 另外, 在 300~360 nm 波段存在弱的臭氧吸收带。图 2c 表明, 晴空时向下太阳散射辐射在 100 hPa 高度层很小, 随着高度的降低散射逐渐增加, 地面达到最大。图 2d 为太阳总辐射(直接辐射+ 向下散射辐射), 由于紫外波段存在着明显的散射, 而且越到底层散射越强, 所以随着高度的降低, 紫外波段的太阳总辐射是降低的, 而且波长越短, 太阳总辐射降低得越快。

选取石家庄市 5—7 月个例来建立夏季的紫外线计算模式, 共选取晴空少云个例 35 个。考虑到模式运算中, 采用了美国夏季标准大气的臭氧垂直廓线而存在一定的误差, 故对模式计算的结果做了适当订正。首先选择 5 月 15 个晴空少云的个例进行上述计算, 将模式计算结果和实况建立 lib 库, 并分别作为序列做线性回归, 求出回归系数, 此后 20 个个例作为预报, 将 MODTRAN 3 输出的结果进行回归系数的订正, 并且每个个例运算后都要进行 lib 库的更新。

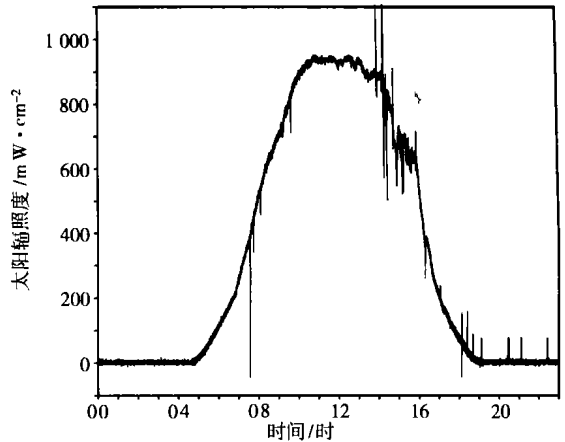


图 1 2000 年 6 月石家庄市地面观测紫外波段的太阳辐射强度的平均日变化

Fig. 1 Mean diurnal variation of ground-based ultraviolet radiant exposure of Shijiazhang in June 2000

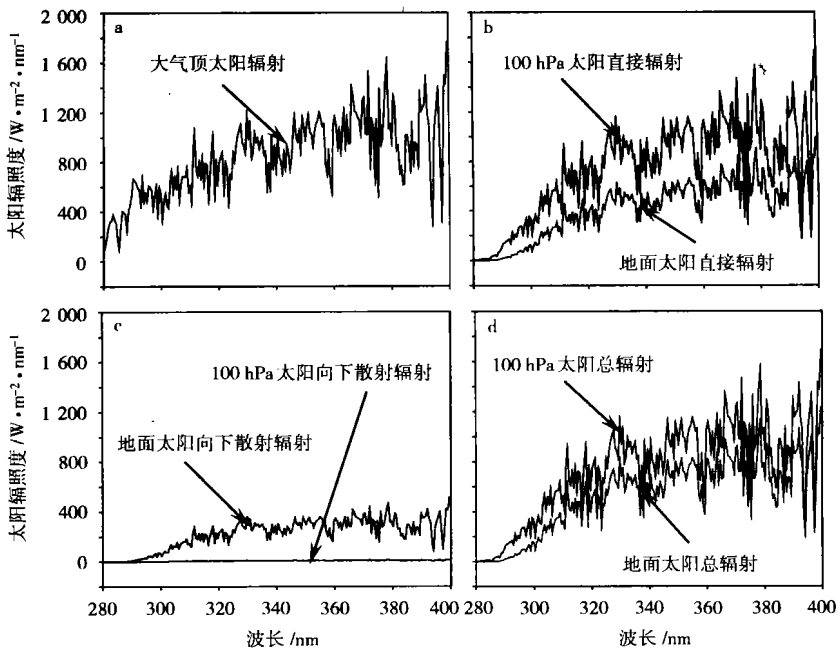


图 2 模式输出的石家庄市 2000-06-10T 12 紫外波段的光谱

Fig.2 Ultraviolet radiation spectrum of Shijiazhang
computed by the model at 12: 00, June 10, 2000

表 3 给出了 lib 库订正后的紫外线辐射强度及指数预报结果, 同时与实况值进行了比较, 紫外线辐射强度的相对误差($\left| \frac{M - S}{S} \right|$, M 为预报强度, S 为实况)为 5.2 %, 指数预报准确率

表 3 紫外线强度及指数模式预报结果与实况值

Table 3 Comparison of the ultraviolet (280~400 nm) radiation computed
by the model with real measurements

日期/ 月-日	能见度/ km	强度/ $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$		指数		日期/ 月-日	能见度/ km	强度/ $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2}$		指数	
		模拟结果	实况	模拟结果	实况			模拟结果	实况	模拟结果	实况
06-04	20.0	828	780	7	6	06-23	12.0	746	783	6	6
06-05	20.0	829	878	7	7	06-27	20.0	824	907	7	8
06-06	15.0	783	797	6	6	06-29	12.0	746	782	6	6
06-08	30.0	895	856	7	7	06-30	25.0	907	857	8	7
06-09	20.0	870	899	7	7	07-01	30.0	913	917	8	8
06-10	20.0	830	878	7	7	07-11	25.0	864	825	7	7
06-12	30.0	884	824	7	7	07-13	11.0	728	637	6	5
06-13	30.0	882	905	7	8	07-23	30.0	837	893	7	7
06-18	20.0	797	723	6	6	07-30	30.0	876	842	7	7
06-21	12.0	683	670	5	5	07-31	30.0	882	856	7	7

(相同指数为正确)为 75 %。图 3 给出了 lib 库订正前后的紫外线辐射强度与实况值的对比情况,可以看出,模式预报结果经 lib 库订正后和实况值在趋势上吻合较好,可见由模式客观化预报紫外线强度是可行的。

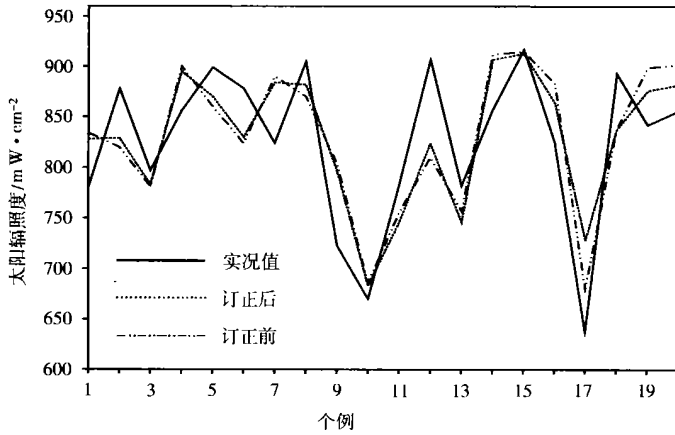


图 3 石家庄市 2000 年夏季 20 个个例的紫外辐射的 lib 库订正前后结果与实况值
Fig. 3 Ultraviolet radiation of Shijiazhuang computed by the model for 20 examples
Not corrected value(dot-dashed line), value corrected by the lib data(dotted line),
and the real measurements(solid line)

3 结 论

(1) 基于中分辨率大气辐射传输模式,应用可得到的大气物理参数,建立了石家庄市夏季晴空少云天气下紫外辐射强度预报模式,并对由于臭氧实时资料的短缺造成的误差进行了订正,经过晴空少云状况下紫外线辐射强度及指数的计算,结果表明,当天实效的紫外辐射强度误差为 5.2 %,指数预报准确率为 75 %。因此,紫外线强度的模式预报具有一定的客观性和可行性。

(2) 通过 lib 库的订正,能一定程度上矫正由于臭氧资料的匮乏带来的误差。

参考文献:

- [1] 张庆阳,张 沅,胡 英.国外紫外线指数预报概况[J].气象,2000,26(11):56-57.
- [2] 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):1-8.
- [3] 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.
- [4] Lacis A H. A parameterization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere[J]. J Atmos Sci, 1974, 31(1): 118-133.
- [5] 吴北婴,李 卫,陈洪滨,等.大气辐射传输实用算法[M].北京:气象出版社,1998:8-9.
- [6] Kneizys F X, Robertson D C, Abreu L W, et al. The MODTRAN 2/3 report and LOWTRAN7 model[M]. North Andover: AFGL-TR Press, 1996: 40-41; 96; 140; 161.
- [7] Middleton W E K. Vision through the atmosphere. Toronto: University of Toronto Press, 1968: 260.
- [8] 傅炳珊,陈渭民.利用中分辨率大气辐射计算模式 MODTRAN3 计算我国太阳直接辐射和散射辐射[J].南京气象学院学报,2001,24(1):51-58.

Ground-Based Ultraviolet Radiation Operational Prediction Model in Clear/Part Cloudy Day

FU Bing-shan¹, CHE Shao-jing¹,
CHEN Wei-min², MA Cui-ping³

(1. Shijiazhuang Bureau of Meteorology, Shijiazhuang 050081, China;

2. Department of Electronic Engineering, NIM, Nanjing 210044, China;

3. Hebei Bureau of Meteorology, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Based on the multiple scattered theory, using a moderate resolution radiative transfer model, a method is developed to calculate the ground-based ultraviolet solar radiation of Shijiazhuang with measured atmospheric parameters as inputs. The model includes two major bands of ozone absorption. For the clear sky, the model mainly considers the multiple scattering of molecules and aerosols; for the part cloudy sky, the model also includes the effect of cloud on ultraviolet solar radiation. The discrete coordinate method was used in the computation of multiple scattering. In addition, the errors caused by the lack of ozone data are corrected. The model results are compared with the real measurements, and results show that the both are in good agreement. This means that the corrected model results of ultraviolet solar radiation can be used for operational forecast.

Key words: clear/part cloudy day; solar ultraviolet radiation; solar ultraviolet index; ozone; correction