

到达地面的紫外辐射强度预报

吴 兑

(广州热带海洋气象研究所, 510080)

提 要

紫外线指数一般用 0~15 的数字来表示,通常规定,夜间的紫外线指数为 0,在热带高原地区,晴天无云时的紫外线指数为 15。世界气象组织规定了单位紫外线指数相当于 $25\text{mW}/\text{m}^2$ 红斑加权剂量率。紫外线指数预报大致可分为统计预报方法和模式预报方法两种。统计预报方法主要依赖于高精密度、高准确性的紫外线实测资料和相关的气象要素观测;而模式预报方法则主要依赖于对平流层臭氧的预报和大气辐射传输模式的应用。

关键词: 紫外线指数 红斑加权剂量率 预报方法

紫外线指数预报大致可分为统计预报方法和模式预报方法两种。统计预报方法主要依赖于高精密度、高准确性的紫外线实测资料和相关的气象要素观测;而模式预报方法则主要依赖于对平流层臭氧的预报和大气辐射传输模式的应用。

1 紫外线指数的含义及其分级

紫外线指数(Ultraviolet Index),也称为“UVI”指数,是一个衡量某地正午前后到达地面的太阳光线中的紫外线辐射对人体皮肤、眼睛等组织和器官可能损伤程度的指标,它主要依赖于纬度、海拔高度、季节、平流层臭氧、云、地面反射率和大气污染状况等条件。

按照国际上通用的方法,紫外线指数一般用 0~15 的数字来表示。通常规定,夜间的紫外线指数为 0,在热带、高原地区,晴天无云时的紫外线指数为 15。紫外线指数值越大,表示紫外线辐射对人体皮肤的红斑损伤程度愈加剧,同样紫外线指数越大,也表示在愈短的时间里对皮肤的伤害程度愈强。

1994 年 7 月举行的世界气象组织关于紫外线指数的专家会议,制定出了全世界统一的紫外线指数的表示形式。规定紫外线指

数是将正午前后对人体皮肤红斑影响的辐射量加权后所得的剂量率,用一个无量纲的数值,即紫外线指数来表示。世界气象组织规定单位紫外线指数相当于 $25\text{mW}/\text{m}^2$ 红斑加权剂量率^[1]。

用紫外线辐射强度的实测资料换算成精确的紫外线指数,从理论上讲需要高精密度的紫外线光谱辐射计资料才能换算,这是因为在 UV-A 与 UV-B 谱段,紫外线辐照度曲线与红斑作用光谱曲线都是非线性的。但是我们注意到,红斑加权辐照度的 90% 以上集中在 295~325nm 的狭窄谱区内,其峰值位于 308 nm,而在此狭窄谱区内,可以从红斑作用光谱曲线得到一个等效的红斑加权订正因子(比如在一定区间用面积平均法逼近一个值),进而使得由紫外线总辐射计观测的紫外线辐射强度资料可以近似地估算为紫外线指数。

介绍一种由紫外线总辐射计观测的紫外线辐射强度估算成为近似的紫外线指数的一种思路。如果使用的是长通式的紫外线辐射计,两组滤光片测值之差即为紫外线辐射强度,单位 W/m^2 ;如果使用的是通带式宽波段紫外线辐射计,可以按照生产商提供的转换

曲线将电压信号换算成为紫外线辐射强度,单位 W/m^2 ;进而可以估算近似的紫外线指数:

$$UVI \approx \frac{D_{\lambda_0} \times E_{uv} \times C_{er} \times 1000}{D_{\lambda} \times \Delta I} \quad (1)$$

式中 E_{uv} 是观测的紫外线辐射强度,单位 W/m^2 ; D_{λ_0} 是 UV-A、UV-B 的谱宽,取为 110nm; C_{er} 是等效红斑订正因子,建议暂用 0.01; D_{λ} 是观测的紫外线辐射谱宽,单位 nm; ΔI 是单位紫外线指数相当的红斑加权剂量率,取为 $25mW/m^2$ 。

中国气象局 2000 年征求意见的《紫外线指数预报业务服务暂行规定(草案)》对紫外线指数预报量级的划分规定:紫外线指数基于到达地面上的紫外线辐射量确定,取值范围为 0~15;紫外线指数预报一般分为五级,其分级和各级所对应的紫外线指数、紫外线辐射强度、对人体的可能影响和需采取的防护措施等的定性描述见表 1。

表 1 中国气象局紫外线指数分级

级别	紫外线指数	紫外线照射强度	对人体可能影响(皮肤晒红时间(分钟))	需采取的防护措施
一级	0,1,2	最弱	100~180	不需要采取防护措施
二级	3,4	弱	60~100	可以适当采取一些防护措施,如:涂擦防晒霜等;
三级	5,6	中等	30~60	外出时戴好遮阳帽、太阳镜和太阳伞等,涂擦 SPF 指数大于 15 的防晒霜;
四级	7,8,9	强	20~24	除上述防护措施外,上午十点至下午四点时段避免外出,或尽可能在遮荫处;
五级	≥10	很强	<20	尽可能不在室外活动,必须外出时,要采取各种有效的防护措施。

表 1 中的防晒霜 SPF 指数在皮肤护理学中称为皮肤保护指数,也称为防晒因子,它所表示的是防晒用品所能发挥的防晒和吸收紫外线的的能力,SPF 指数的数值每一个单位代表在日光下 15 分钟而不会受到紫外线的伤害。比如防晒霜上标有“SPF15”字样,即表

示涂擦该防晒用品后,能在阳光下停留 $15 \times 15 = 225$ 分钟,保护皮肤不会受到紫外线的伤害。

中国香港天文台、加拿大天气局、美国环境保护局等也有类似的分级。

2 美国的紫外线指数预报方法

确定地面上的紫外辐射量,可用地面仪器测定,也可用总臭氧量由辐射传输模式推断出。美国国家天气局(NWS)采用了后一种方法。利用辐射传输模式只需输入几个量就可以计算晴空(无云)条件下的紫外辐射值。为确定特定位置上的紫外光谱辐照度,需输入的参数包括:该位置上方的气柱臭氧总量、纬度、日期、时间。模式利用后 3 个输入参数确定太阳到地球的距离,并由此计算出到达大气上界的太阳辐射以及太阳天顶角。太阳天顶角用来确定地球表面的紫外辐射入射角及紫外辐射穿透大气层的光学路径。

在中纬度地区夏季各月和热带地区全年,臭氧总量的日变化很小($\pm 1\%$)。用 Mckenzie 等人的辐射放大因子法判断,晴空条件下的紫外辐射量的日变化也很小($\pm 1.25\%$)。对于任何一天而言,影响紫外辐射强度的因素还有纬度,当地的日照时间、云量、云状,以及海拔高度、地面反照率、对流层大气的污染程度、霾等。该模式综合考虑了污染物和霾对到达地面的紫外辐射的影响。但是缺乏用以检验这些计算结果的野外观测资料。紫外辐射随着高度增加和散射量的减少而增加。水、沙、水泥、雪也能明显地反射紫外辐射。当分析紫外辐射的观测资料时,这些因素均需加以考虑。

美国天气局根据极轨卫星探测的数据得出臭氧总量,用各种数值模式确定云量。目前,美国紫外线指数预报取地表紫外反照率为常数 0.05,这与美国最普通的地表类型所测得的紫外辐射反照率是一致的。光学厚度是关于气柱不透明度的无量纲值,给定常数为 0.2,干洁大气的光学厚度为 0.0。但随着具有吸收和散射作用的气溶胶及各种污染气体的含量的增加,光学厚度将随之增加,可高

达 2.5。在目前的 UVI 预报中,对流层污染和霾对紫外辐射的影响及其预报问题尚未考虑^[1]。

2.1 臭氧预报

目前,美国国家天气局用以确定地面紫外辐射的臭氧资料,来自 NOAA 卫星上搭载的太阳后向散射紫外线臭氧传感器/2 (SBUV/2) 和 TIROS 业务垂直探测器 (TOVS)。其中 TOVS 资料作为 SBUV/2 资料出现问题时的备份。从 SBUV/2 仪获取的臭氧总量资料,经 UVI 处理器转换为 $1^\circ \times 1^\circ$ 或 181×360 点的等经纬度网格资料,此臭氧场是“昨天”的。

为预报明天的紫外辐射量,必须制作明天的臭氧场预报。研究发现,臭氧总量场与 50hPa 上的温度场 (T_{50}) 为正相关,而与 100hPa 和 500hPa 上的位势高度场 (Z_{100} 和 Z_{500}) 有一定的负相关。假定从前天至昨天的高度场、温度场变化与臭氧场变化之间的关系,可用于推断昨天至明天的臭氧场,那么昨天至明天的总臭氧变化的预报方程为:

$$\Delta O_3 = a\Delta Z_{500} + b\Delta Z_{100} + c\Delta T_{50} + d \quad (2)$$

其中: ΔO_3 是臭氧总量从昨天到明天的预测差异; ΔZ_{100} 、 ΔZ_{500} 分别是昨天到明天 100hPa 和 500hPa 上的位势高度变化; ΔT_{50} 是昨天到明天 50hPa 上的温度变化; a 、 b 和 c 为回归系数; d 为回归常数。回归系数为:

$$a = \frac{\Delta O_3}{\Delta Z_{500}} \quad (3)$$

$$b = \frac{\Delta O_3}{\Delta Z_{100}} \quad (4)$$

$$c = \frac{\Delta O_3}{\Delta T_{50}} \quad (5)$$

其中 $\Delta O_3/\Delta x$ 是从前天到昨天的臭氧量随高度场、温度场的变化。预报的臭氧差分加上昨天的臭氧场,即为明天的臭氧预报场:

$$O_{3,next} = O_{3,last} + \Delta O_3 \quad (6)$$

此过程包括新回归系数的形成,需要每天计算。上述探讨,与一个大气臭氧直接回归参数相比,易于得出臭氧的最大与最小值,它们对地面所受的紫外辐射影响最大。

一般地,最高的臭氧值出现在高纬度地带,最低的臭氧值出现在热带,3 月份臭氧值的变动范围最大(230~454DU),9 月份变动范围最小(246~338DU)。

2.2 海平面晴空紫外辐射剂量率的计算

如果有了预报的可用的臭氧场,可以利用辐射传输模式,在 $1^\circ \times 1^\circ$ 的经纬度网格点上确定波长为 290~400nm 逐波长的光谱辐照度。输入的其他参数包括:表示大气光学厚度的参数化值、地面紫外反照率、纬度、日期及时间。取正午时间,地面紫外反照率为 5%,光学厚度为 0.2,光谱辐照度值利用国际照明委员会作用光谱经加权处理确定。然后将这些加权光谱辐照度从 290nm 到 400nm 积分,得到晴空条件下海平面的红斑辐照度 ($mW \cdot m^{-2}$) 或剂量率。由于表示红斑效应的紫外辐射量或剂量要比剂量率更有意义,因此将剂量率在正午时间(当地时间标准时 11:30~12:30)积分,得出相应的值。

在计算机上运行辐射传输模式来对 181×360 网格坐标上的各点进行预测,甚至在 Cray-90 机上也要数分钟 CPU 时间。另一个方法是用一个三维查算表,根据臭氧量、纬度、日期即可查到对应值。对这两种方法进行比较,其相关系数为 0.999,平均差值为 $0.017 mW/m^2$ 。使用查算表可在几秒钟内找到 181×360 网格点上各点所对应的剂量率值。

2.3 对晴空海平面紫外辐射剂量率的高度订正

由于海拔高度越高,空气越稀薄,其结果是紫外线被散射的越少,紫外辐射量就越大。因此,计算晴空条件下的 UVI 值,需根据测站海拔高度对上述海平面晴空计算值进行修正。最简单的方法是引入一个修正值。Frederick 利用模式计算得出的修正值为每千米 6%,而 Blumthaler 根据直接观测资料给出的修正值为 14%~18%。由于直接观测资料中包括了空气污染、地面反照率等局地变化的影响,因此对于人们关注的大尺度紫外辐射问题,其修正值可由 Frederick 模式

给出的方程表示:

$$adj = a_0 + a_1 Z_{sf} + a_2 Z_{sf}^2 \quad (7)$$

其中: $a_0 = -0.04556$; $a_1 = 6.62033$; $a_2 = -0.23067$; 海拔高度 Z_{sf} 单位是 km 。对于开始的 1km , 修正值为 6.34% , 此后, 每增加 1km 的修正值增量逐步减少。

2.4 云况的订正

云对紫外辐射的减弱作用十分明显。在某些阴天情况下, 到达地面的紫外辐射要比晴空情况下减少 30% 。虽然有时云的侧面反射可使到达地面的紫外辐射得到增加, 但这种影响覆盖区域很小、持续时间很短。而天空少云时, 云的移动使得一段时间内地面处于晴空日照情况下, 另一段时间内处于被云遮蔽的情况下。也就是说, 在一段时间内(即几分钟或几小时), 可能出现晴空条件下的 UVI 最大值, 也可能出现受云影响减弱的 UVI 值。因此, 在预报中午有云时, 需要对晴空 UVI 进行修正。美国国家天气局的方法是: 利用模式输出统计预报(MOS)的晴、少云、多云和阴天的概率, 对云量进行量化处理, 在此基础上对晴空 UVI 进行修正。

由于阴天的概率与晴天、少云、多云等三个概率具有代数关系, 即几个概率之和为 1 , 根据 MOS 云概率预报和实际观测资料, 可利用回归方法求出有关常数及晴天、少云、多云的云系数(概率分别为 P_c, P_s, P_b): 常数 ($Const$) = 0.316 ± 0.172 , 晴天系数(a_c) = 0.676 ± 0.037 , 少云系数(a_s) = 0.580 ± 0.033 , 多云系数(a_b) = 0.410 ± 0.077 , 用来确定云衰减因子(CAF)的方程为:

$$CAF = Const + a_c P_c + a_s P_s + a_b P_b \quad (8)$$

因此, 晴天概率为 100% 的 CAF 为 0.992 , 少云概率为 100% 的 CAF 为 0.896 , 多云概率为 100% 的 CAF 为 0.726 , 阴天概率为 100% 的 CAF 为 0.316 。

UVI 对于指导人们避免紫外辐射过度曝晒具有重要作用, 但在计算方面尚需改进。

$$UVR = -6.4465 + 7.28983 \sinh_0 + 0.03374 \times Td'_{500} + 0.07784 \times T'_{200} \\ + 0.00072 \times Z'_{200} \times 10 \dots + 0.02369 \times Td'_{850} - 0.04502 \times T'_{700}$$

概括地说, 应当考虑更加真实的大气状况和地面状况, 对紫外辐射的传输特性进行深入的研究, 包括应用先进的多层云辐射传输模式、考虑云的特性和地面反照率的影响等^[1]。

霾和对流层污染对紫外辐射的影响尚需深入研究。目前, 污染的中尺度特征难以从天气观测资料中得以分析。但对霾而言, 可作为一种例外。因为尽管地面及整个行星边界层的观测资料不足, 难以实现霾的参数化, 但霾与行星边界层的绝对温度和露点温度具有相应的联系。

此外, 为研究地面紫外反照率的时空变化特性, 需建立无云条件下的地面紫外反照率数据库。研究认为, 利用 TOMS 资料以及相应的云分析方案, 建立这样的数据库是不难实现的。

3 国内的紫外线指数预报方法简介

我国进行紫外线预报技术的研究是从 20 世纪 90 年代初开始的, 1994 年郭松、周秀骥等完成了青藏高原大气臭氧及紫外线辐射观测结果的初步分析^[2]。1996 年吕达仁、李卫等完成了长春地区紫外光谱辐射观测和初步分析^[3]。1999 年王普才、吴北婴等进行了紫外辐射传输模式计算与实际测量的比较。该模式应用平面平行大气假设, 考虑了紫外谱段的臭氧吸收、二氧化硫吸收、分子散射和气溶胶散射。但该模式还不是一个业务化模式^[4,5]。

北京市气象局用晴空日两年的地面紫外线辐射实际观测资料, 与国家气象中心 T106 全球数值预报模式的产品建立了紫外线强度预报方程, 用来预报紫外线强度。

他们将紫外线辐射强度分成 5 个等级作为预报变量, 把 T106 模式提供的 850、700、500、400、300、200hPa 各层的高度、温度、露点温度预报场作为预报因子, 通过逐步回归等方法, 筛选了因子, 并建立了多元线性 MOS 方程^[6]:

$$+ 0.08264 \times T'_{500} - 0.04963 \times T'_{400} \quad (9)$$

其中: $T'_{200} = 7.05693 + 1.17062 \times T_{200}$, T_{200} 是 200hPa 温度; $T'_{400} = 0.08215 + 1.00932 \times T_{400}$, T_{400} 是 400hPa 温度; $T'_{500} = -1.20686 + 0.97533T_{500}$, T_{500} 是 500hPa 温度; $T'_{700} = -0.40547 + 1.00359 \times T_{700}$, T_{700} 是 700hPa 温度; $Z'_{200} = -828.5684 + 1.06579 \times Z_{200}$, Z'_{200} 是 200hPa 位势高度; $Td'_{850} = 4.71044 + 0.55246 \times Td_{850}$, Td_{850} 是 850hPa 露点温度; $Td'_{500} = 4.4243 + 0.53207 \times Td_{500}$, Td_{500} 是 500hPa 露点温度; h_0 是太阳高度角。

辽宁省气象科研所根据现在国内外紫外线预报技术发展动态,结合本地特点及现有的数值预报基础,设计了一个到达地面紫外线辐射强度预报模式。该模式充分考虑了平流层中的臭氧量、城市中的气溶胶和二氧化硫的变化,再根据预报城市的地理纬度、海平面高度及预报时间的太阳高度角等预报出辽宁 14 个城市晴天的到达地面紫外线辐射强度,然后通过数值天气预报得出各城市云量,计算出有云天气的紫外线辐射强度,最后根据紫外线辐射观测值,对紫外辐射强度预报进行最后的订正^[7]。

广州热带海洋气象研究所根据到达地面的紫外辐射的气候分布,得到华南地区晴天

的到达地面紫外线辐射强度,然后通过热带有限区域数值天气预报模式得出各地云量,计算出有云天气的紫外线辐射强度,最后根据美国 Eppley 紫外线辐射仪观测值,对紫外辐射强度预报进行订正后,发布华南地区各大城市和主要旅游区的紫外线指数预报。

另外,上海、武汉、杭州、南昌、昆明、天津、石家庄、乌鲁木齐等城市也相继选用气候学方法、统计学方法、多元回归方法和辐射传输模式开展了紫外线辐射强度(紫外线指数)预报。

参考文献

- 1 C S Long, A J Miller, Hai-Tien Lee et al. Ultraviolet index forecasts issued by the National Weather Service, Bull AMS, 1996, 77(4), 729~748.
- 2 郭松,周秀骥,张晓春. 青海高原大气 O₃ 及紫外辐射 UV-B 观测结果的初步分析,科学通报,1994,39(1):50~53.
- 3 吕达仁,李卫,李福田等. 长春地区紫外光谱(UV-A, UV-B)辐射观测和初步分析,大气科学,1996,20(3):343~351.
- 4 王普才,吴北婴,章文星. 影响地面紫外辐射的因素分析,大气科学,1999,23(1):1~8.
- 5 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,大气科学,1999,23(3):361~364.
- 6 张书余. 医疗气象预报基础,北京:气象出版社,1999.
- 7 武朝德,白乐生,龚强. 太阳紫外辐射观测及预报研究,辽宁气象,1999,(3):43~45.

Forecast of Surface Ultraviolet Radiation

Wu Dui

(Guangzhou Institute of Tropical and Oceanic Meteorology, Guangdong 510080)

Abstract

Ultraviolet Index (UVI) is 0—15, a unitless value. At night, UVI is 0. On tropical plateau, UVI is 15 on clear-sky. The WMO standard UV index unit is equal to 25mW/m² erythemally weighted dose rate. The major methods of forecast of surface sunny Ultraviolet Index consist of statistics-forecast and model-forecast. The statistics-forecast mainly depends on the observed UVI and cloud-amount data, and the model forecast mainly depends on forecasting the ozone field and applied radiative transfer model.

Key Words: ultraviolet index erythemally weighted dose rate forecast method