

文章编号: 1000-2022(2003) 05-0685-09

紫外线辐射强度预报模型研究

曾 艳, 吴幼乔

(昆明市气象局, 云南 昆明 650034)

摘 要:以陈万隆的到达地面的紫外辐射的参数化方案、Frederick 模式中的高度修正方程和 NWS 的云量修正方程为基础, 建立了一个到达地面紫外总辐射的预测模型, 进行紫外线辐射强度预报。结果表明: 模型能很好地反映出晴天紫外线辐射强度的变化趋势及其规律, 少云、多云和阴天由于天空状况复杂, 预报误差相对较大, 但基本上能反映出紫外线辐射强度的变化情况。模型考虑因子较全面, 可以用于城市紫外线辐射强度预报。

关键词: 紫外线; 辐射强度; 预报; 模型

中图分类号: P422.62 **文献标识码:** A

国内外对紫外线辐射强度预报模型已有许多的研究, 美国国家气象局(NWS)采用大气辐射传输模型, 通过对臭氧场的预报来预报晴天紫外线辐射强度, 然后进行高度和云量的修正^[1]; 南京气象学院陈万隆基于 Benov 模型建立了紫外线辐射强度预报模型^[2], 随后又提出了建立在 Bird 和 Hulstorm 计算晴天到达地面太阳总辐射的参数化方程基础上的紫外线辐射强度预报模型^[3], 并进行了云量修正。

昆明地处低纬高原, 太阳投射角较大, 日照时间长, 空气稀薄, 云、雾、尘粒少, 太阳辐射经过大气的光程较短, 对紫外线辐射吸收少, 从而导致到达地面的紫外线辐射量比同纬度低海拔地区强。因此, 进行紫外线辐射强度预报, 对减少紫外线辐射的伤害具有重要意义。

1 紫外线辐射强度预报模型

采用陈万隆的计算晴天到达地面太阳总辐射的参数化方案, Frederick 模式中的海拔高度修正方程^[1], NWS 的云衰减因子方程, 建立紫外线辐射强度预报模型, 同时考虑到模型中气压参数本身已包含有高度信息, 在进行高度修正前, 先进行气压修正。

1.1 晴天到达地面的紫外线总辐射方程

晴天到达地面的紫外线总辐射方程为

$$Q_{uv-1} = \frac{\eta(\varphi, h) \times Q_0}{1 - A_1 \times A_2} \quad (1)$$

收稿日期: 2002-08-07; 改回日期: 2002-12-10

基金项目: 昆明市科技局资助项目(昆科社字 2000-03)

作者简介: 曾 艳(1969-), 女, 云南昆明人, 工程师, 学士, 研究方向: 植物生理、生态及应用气象。

式中 Q 为到达地面太阳总辐射通量密度 (单位: W/m^2), A_2 为晴空对紫外线的反射率, (Q 、 A_2 的计算方法详见文献[3]), $A_1 = 0.067^{[4]}$, 为下垫面对紫外线的反射率, $\frac{1}{1 - A_1 \times A_2}$ 为地面与晴天大气对紫外线多次反射引起的放大率, $\eta = 0.043^{[5]}$, 为紫外总辐射与太阳总辐射的比值。

1.2 气压修正方程

Frederick 的高度修正方程是建立在海平面的基础上的, 而在模型中所使用的测站气压本身就包含有高度的信息, 所以在进行高度修正之前必须进行气压的修正。采用压高公式 $p = p_0 \exp(-\int_0^Z \frac{g}{T} dZ)$ 将气压订正到海平面, 将 p_0 代入(1)式, 计算出海平面上的 Q_{uv-0} 值。

1.3 高度修正方程

海拔高度越高, 紫外线被散射的越少, 紫外辐射量就越大。因此, 计算晴天到达地面的紫外线总辐射值需要根据测站的海拔高度对 Q_{uv-0} 值进行修正。虽然 Blumthaler^[6] 根据直接观测资料给出每千米的修正值为 14% ~ 18%, 但由于直接观测资料中包含了局地变化的影响, 而在模式中并未考虑, 因此海拔高度修正值 H_c (单位: %/km) 用 Frederick 模式给出的方程计算。

$$H_c = a_0 + a_1 \times z_c + a_2 \times z_c^2. \quad (2)$$

式中 $a_0 = -0.04556$, $a_1 = 6.62033$, $a_2 = -0.23067$, z_c 是测站的海拔高度 (单位: km)。

海拔高度修正后的紫外线辐射

$$Q_{uv-1} = Q_{uv-0} \times (H_c + 1). \quad (3)$$

1.4 云量修正方程

云对紫外线辐射有明显的减弱作用, 有云时需要将晴空紫外线辐射值进行修正, 采用 NWS 的云衰减因子方程进行云量修正

$$C_c = C_0 + a_c P_c + a_s P_s + a_b P_b. \quad (4)$$

式中 $C_0 = 0.316 \pm 0.172$, $a_c = 0.676 \pm 0.037$ (晴空), $a_s = 0.580 \pm 0.033$ (少云), $a_b = 0.410 \pm 0.077$ (多云)。 P_c 、 P_s 、 P_b 分别为晴空、少云、多云的概率。因此得到晴空 (云量为 0) 概率 P_c 为 100% 时 C_c 为 0.992, 少云 (云量为 3) 概率 P_s 为 100% 时 C_c 为 0.896, 多云 (云量为 7) 概率 P_b 为 100% 时为 0.726, 阴天 (云量为 10) 概率为 100% 时 C_c 为 0.316。这样可以简单地通过云量多少采用内插方法计算出 C_c 。

云天到达地面的紫外线辐射

$$Q_{uv-2} = Q_{uv-1} \times C_c. \quad (5)$$

2 结果分析

2.1 资料和方法

2.1.1 资料

(1) 昆明基准气候站 2000 年 1 月、4 月、7 月、10 月每天北京时间 14 时的太阳辐射实测资料和气压、气温、露点温度、云量、能见度等地面观测资料;

(2) 2000 年 1、4、7、10 月中阴天、晴天、多云天、少云天四种典型天气 08 时至 18 时正点逐时的太阳辐射实测资料, 以及冬至、夏至、春分、秋分 4 d 08 时至 18 时的逐时太阳辐射实测资料和上述对应时段地面观测资料;

(3) 2001 年、2002 年典型天气地面观测资料以及太阳辐射实测资料。

2. 1. 2 方 法

(1) 根据上述资料, 用气压、气温、露点温度、云量、能见度、测站的经、纬度等因子按(1) ~ (5)式计算紫外线辐射预报值。

(2) 根据太阳总辐射的实况值按照公式 $Q_{uv} = \frac{\eta(\varphi, h) \times Q}{1 - A_1 \times A_2}$, $A_1 = 0.067$, 假设能见度较好 $A_2 = 0.0685$, 计算得出据 Q 实测的紫外线辐射计算值。

(3) 特殊情况的处理: 阴天遇有直接辐射的时次, 用总辐射减去直接辐射后再计算; 遇下雨停止观测, 无总辐射的时次不计算。

2. 2 紫外线辐射预报结果分析

2. 2. 1 晴天到达地面的太阳总辐射

模型计算出的晴天太阳总辐射值与实测值强度接近(表 1), 拟合度高, 误差小, 日变化趋势一致(图 1)。

表 1 2000 年 1 月 3 日逐时 Q 预报值与实测值

Table 1 Hourly predictions and observations of global radiation, January 3, 2000 W/m^2

| 时间 | Q 预报值 | Q 实测值 | 时间 | Q 预报值 | Q 实测值 |
|-------|---------|---------|-------|---------|---------|
| 09:00 | 213.1 | 246.0 | 14:00 | 722.3 | 738.0 |
| 10:00 | 418.4 | 454.0 | 15:00 | 631.7 | 627.0 |
| 11:00 | 585.4 | 631.0 | 16:00 | 480.9 | 432.0 |
| 12:00 | 696.4 | 749.0 | 17:00 | 282.7 | 204.0 |
| 13:00 | 741.8 | 770.0 | 18:00 | 65.6 | 7.0 |

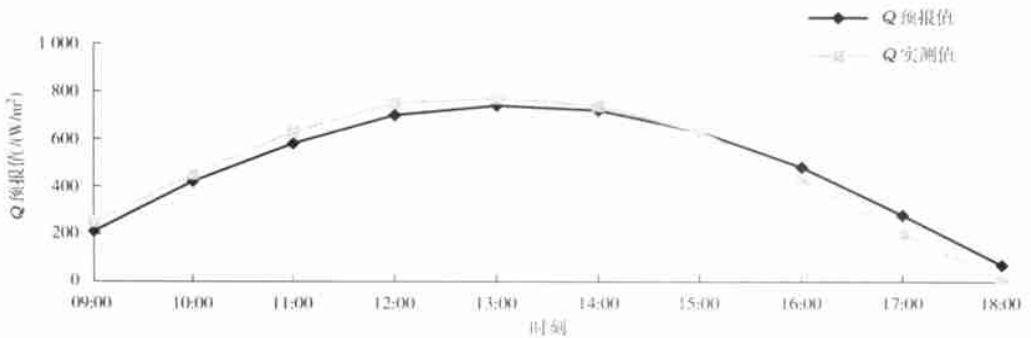


图 1 2000 年 1 月 3 日 Q 预报值与实测值日变化

Fig.1 Diurnal variation of the predictions and observations of global radiation, January 3, 2000

2. 2. 2 晴天到达地面的紫外线辐射

用模型计算出的晴天 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值相近, 变化趋势一致, 拟合度高, 13 时前相对误差较小, 13 时后相对误差增大(表 2、图 2)。一天之中, 出现的最大 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算的最大值的差值为 $1.5 W/m^2$ 。晴天正午前后(14 时)UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值误差在 $3 W/m^2$ 以内(表 3)。

表 2 2000 年 1 月 3 日逐时 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值

Table 2 Hourly predictions of ultraviolet radiation and the values of ultraviolet radiation calculated from global radiation observations, January 3, 2000 W/m^2

| 时间 | UV 预报值 | 据 Q 实测的 UV 计算值 | 误差 | 时间 | UV 预报值 | 据 Q 实测的 UV 计算值 | 误差 |
|-------|--------|------------------|------|-------|--------|------------------|-----|
| 09:00 | 9.8 | 10.6 | -0.8 | 14:00 | 33.9 | 31.9 | 2.0 |
| 10:00 | 19.5 | 19.6 | -0.1 | 15:00 | 29.6 | 27.1 | 2.5 |
| 11:00 | 27.4 | 27.3 | 0.1 | 16:00 | 22.5 | 18.7 | 3.8 |
| 12:00 | 32.7 | 32.4 | 0.3 | 17:00 | 13.1 | 8.8 | 4.3 |
| 13:00 | 34.8 | 33.3 | 1.5 | 18:00 | 3.0 | 0.3 | 2.7 |

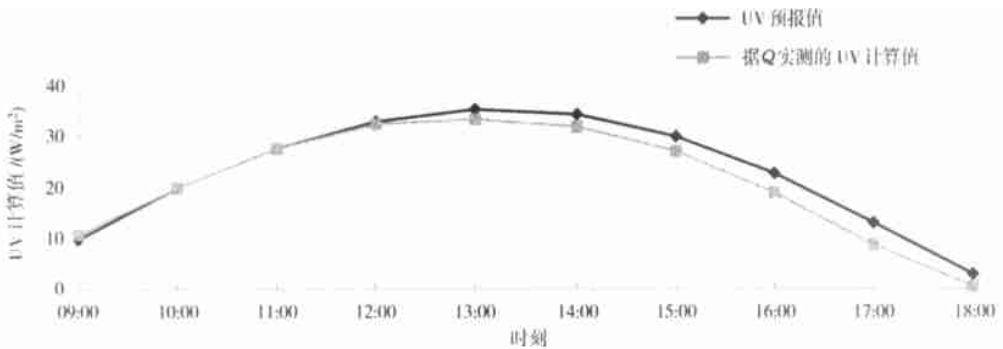
图 2 2000 年 1 月 3 日 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值的日变化

Fig. 2 Diurnal variation of the predictions of ultraviolet radiation and the values of ultraviolet radiation calculated from global radiation observations, January 3, 2000

表 3 2000 年 1 月晴天 14 时 Q 、UV 预报值、据 Q 实测的 UV 计算值及 UV 误差

Table 3 Predictions of global and ultraviolet radiation, values of ultraviolet radiation calculated from global radiation observations and errors of ultraviolet radiation prediction at 1400 BST, January 2000 W/m^2

| 日期/日 | Q 预报值 | Q 实测值 | UV 预报值 | 据 Q 实测的 UV 计算值 | UV 误差 |
|------|---------|---------|--------|------------------|-------|
| 1 | 717.0 | 735.0 | 33.7 | 31.8 | 1.9 |
| 2 | 635.0 | 686.0 | 29.1 | 29.6 | -0.5 |
| 3 | 722.3 | 738.0 | 33.9 | 31.9 | 2.0 |
| 4 | 727.7 | 750.0 | 34.2 | 32.4 | 1.8 |
| 5 | 726.1 | 741.0 | 34.1 | 32.0 | 2.1 |
| 8 | 727.6 | 719.0 | 34.2 | 31.1 | 3.1 |
| 9 | 734.6 | 726.0 | 34.5 | 31.4 | 3.1 |
| 10 | 727.1 | 719.0 | 34.1 | 31.1 | 3.0 |
| 12 | 733.8 | 728.0 | 34.4 | 31.4 | 3.0 |
| 13 | 736.9 | 739.0 | 34.6 | 31.9 | 2.7 |
| 16 | 750.1 | 759.0 | 35.2 | 32.8 | 2.4 |
| 17 | 754.3 | 762.0 | 35.4 | 32.9 | 2.5 |

2. 2. 3 阴天到达地面的紫外线辐射

阴天 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值相对误差较大, 这是因为预报值是按云量为 10 来进行云的修正的, 而据 Q 实测的 UV 计算值是瞬时值, 是否有太阳直射、云层的厚薄或者是否有雨等对太阳总辐射值影响较大, 但就一天而言, 对有直接辐射的时次(16 时) 进行处理过后, 出现的最大 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算的最大值的差值为 2.7 W/m^2 (表 4、图 3)。

表 4 2000 年 6 月 21 日逐时 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值

Table 4 Hourly predictions of ultraviolet radiation and the values of ultraviolet radiation calculated from global radiation observations, June 21, 2000

| 时间 | UV 预报值 | 据 Q 实测的 UV 计算值 | 云量 | 时间 | UV 预报值 | 据 Q 实测的 UV 计算值 | 云量 |
|-------|--------|------------------|----|-------|--------|------------------|----|
| 08:00 | 4.0 | 3.2 | 10 | 14:00 | 16.4 | 11.3 | 10 |
| 09:00 | 7.4 | 4.8 | 10 | 15:00 | 15.0 | 13.7 | 10 |
| 10:00 | 10.5 | 10.7 | 10 | 16:00 | 12.8 | 19.4 | 10 |
| 11:00 | 12.9 | 16.7 | 10 | 17:00 | 9.8 | 8.5 | 10 |
| 12:00 | 14.6 | 5.1 | 10 | 18:00 | 6.3 | 3.5 | 10 |
| 13:00 | 16.7 | 5.9 | 10 | | | | |

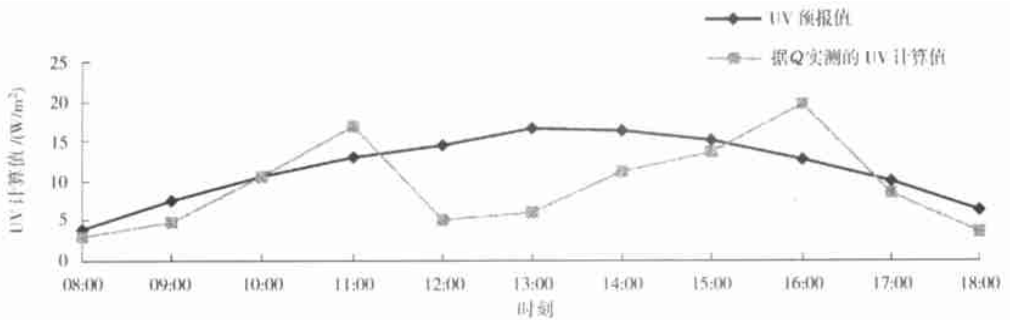


图 3 2000 年 6 月 21 日 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值的日变化

Fig. 3 Diurnal variation of the predictions of ultraviolet radiation and the values of ultraviolet radiation calculated from global radiation observations, June 21, 2000

2. 2. 4 少云天到达地面的紫外线辐射

少云天由于云量少, 虽然有云遮蔽的时间短, 但观测时有云对据 Q 实测的 UV 计算值的影响较大(13 时、14 时、16 时、18 时), UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值的相对误差大, 但 UV 预报值基本能反映出一天中紫外线辐射强度的变化趋势(表 5、图 4)。一天中出现的最大 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算的最大值的差值为 9.6 W/m^2 。

2. 2. 5 多云天到达地面的紫外线辐射

多云天由于云量多, 有云遮蔽的时间长, 再加上可能出现的阵性降雨, UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值相对误差较大(13 时、16 时), 一天中出现的最大 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算的最大值的误差为 5.7 W/m^2 (表 6、图 5)。

表 5 2000 年 4 月 24 日逐时 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值

Table 5 Hourly predictions of ultraviolet radiation and the values of ultraviolet radiation calculated from global radiation observations, June 24, 2000

 W/m^2

| 时间 | UV 预报值 | 据 Q 实测的 UV 计算值 | 云量 | 时间 | UV 预报值 | 据 Q 实测的 UV 计算值 | 云量 |
|-------|--------|------------------|----|-------|--------|------------------|----|
| 08:00 | 9.3 | 6.9 | 0 | 14:00 | 46.0 | 15.0 | 3 |
| 09:00 | 20.9 | 19.8 | 0 | 15:00 | 41.9 | 36.8 | 3 |
| 10:00 | 34.6 | 28.7 | 1 | 16:00 | 35.0 | 3.3 | 3 |
| 11:00 | 42.8 | 35.9 | 1 | 17:00 | 24.7 | 22.4 | 4 |
| 12:00 | 48.2 | 39.1 | 1 | 18:00 | 14.6 | 7.4 | 4 |
| 13:00 | 48.7 | 14.9 | 2 | | | | |

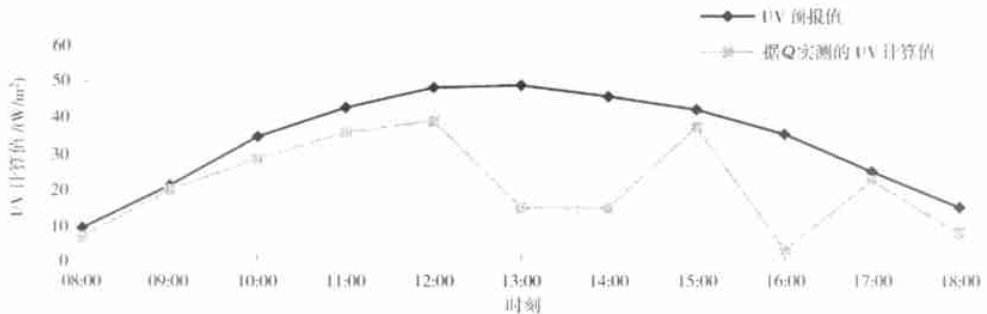
图 4 2000 年 4 月 24 日 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值的日变化

Fig. 4 Diurnal variation of the predictions of ultraviolet radiation and the values of ultraviolet radiation calculated from global radiation observations, April 24, 2000

表 6 2002 年 5 月 5 日逐时 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值

Table 6 Hourly predictions of ultraviolet radiation and the values of ultraviolet radiation calculated from global radiation observations, May 5, 2002

 W/m^2

| 时间 | UV 预报值 | 据 Q 实测的 UV 计算值 | 云量 | 时间 | UV 预报值 | 据 Q 实测的 UV 计算值 | 云量 |
|-------|--------|------------------|----|-------|--------|------------------|----|
| 08:00 | 12.1 | 13.3 | 4 | 13:00 | 38.3 | 11.4 | 7 |
| 09:00 | 20.0 | 10.1 | 6 | 14:00 | 39.6 | 44.3 | 6 |
| 10:00 | 28.1 | 30.9 | 6 | 15:00 | 36.2 | 41.4 | 6 |
| 11:00 | 34.5 | 39.6 | 6 | 16:00 | 32.0 | 12.7 | 5 |
| 12:00 | 41.0 | 46.7 | 5 | 17:00 | 22.7 | 20.6 | 6 |

2.2.6 阴雨天到达地面的紫外线辐射

由于阴雨天没有太阳辐射观测值,因此紫外线辐射预报误差大。在实际应用过程中,阴雨天紫外线辐射不做预报,直接按 0 值处理。

2.3 紫外线辐射强度影响因子分析

2.3.1 紫外线辐射强度的变化

昆明地区紫外线强度在夏季最大,春秋次之,冬季最小。春季紫外线辐射强度大于秋季。紫外线辐射强度的日变化趋势是:中午时段大,早晚小;一天之中,13 时紫外线强度最强,14 时次

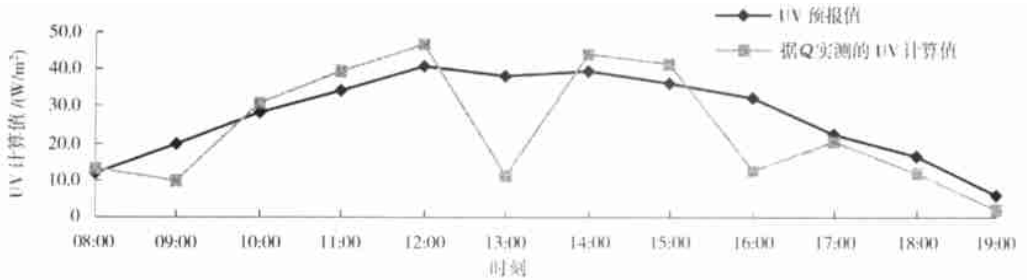


图 5 2002 年 5 月 5 日逐时 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值的日变化

Fig. 5 Diurnal variation of the predictions of ultraviolet radiation and the values of ultraviolet radiation calculated from global radiation observations, May 5, 2002

之。

晴天紫外线辐射预报值与据 Q 实测的 UV 计算值的误差在一天中的正午前小, 正午后大; 一年中冬季小, 夏季大, 春秋次之。

2. 3. 2 紫外线强度与云量的关系

云对紫外线辐射有明显的衰减作用, 根据模型计算, 昆明地区即使是阴天(夏至这天)也有较大的紫外线辐射通量(17 W/m^2)到达地面, 这就是说, 整个夏天, 有云无云, 紫外辐射的强度均较大。

2. 3. 3 紫外线强度与海拔高度的关系

2. 3. 3. 1 高度修正

在近地层, 海拔高度越高紫外线辐射越强。在大尺度的系统中紫外线辐射昆明比同纬度地区紫外线辐射增强 11.66 %。

从表 7 可以看出, UV 预报值高度修正前比修正后偏小 $1.0 \sim 3.7 \text{ W/m}^2$, 高度修正后 UV 预报值更接近据 Q 实测的 UV 计算值, 更能反映昆明高海拔太阳辐射和紫外线较强的特征。

表 7 2000 年 1 月 3 日海拔高度修正前后 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值

Table 7 Predictions of ultraviolet radiation before and after height correction and the values of ultraviolet radiation calculated from global radiation observations, January 3, 2000 W/m^2

| 时间 | 修正后 | 据 Q 实测的 UV 计算值 | 修正前 | 时间 | 修正后 | 据 Q 实测的 UV 计算值 | 修正前 |
|-------|------|----------------|------|-------|------|----------------|------|
| 08:00 | 9.8 | 10.6 | 8.8 | 13:00 | 33.9 | 31.9 | 30.4 |
| 09:00 | 19.5 | 19.6 | 17.5 | 14:00 | 39.6 | 27.1 | 26.5 |
| 10:00 | 27.4 | 27.3 | 24.5 | 15:00 | 22.5 | 18.7 | 20.1 |
| 11:00 | 32.7 | 32.4 | 29.3 | 16:00 | 13.1 | 8.8 | 11.7 |
| 12:00 | 34.8 | 33.3 | 31.1 | 17:00 | 3.0 | 0.3 | 2.7 |

2. 3. 3. 2 气压修正

从表 8 可以看出, 气压修正后的 UV 预报值比气压修正前的 UV 预报值小 $0.2 \sim 0.5 \text{ W/m}^2$, 气压修正后的 UV 预报值更接近据 Q 实测的 UV 计算值。如果测站海拔高度不高, 可忽略气压修正。

表 8 2000 年 6 月 21 日气压修正前后 UV 预报值与据 Q 实测的 UV 计算值

Table 8 Predictions of ultraviolet radiation before and after atmospheric pressure correction and the values of ultraviolet radiation calculated from global radiation observations, June 21, 2000

| | | | | W/m^2 | | | |
|-------|------|------------------|------|---------|------|------------------|------|
| 时间 | 修正后 | 据 Q 实测的 UV 计算值 | 修正前 | 时间 | 修正后 | 据 Q 实测的 UV 计算值 | 修正前 |
| 08:00 | 4.0 | 3.2 | 4.3 | 13:00 | 16.7 | 5.9 | 17.0 |
| 09:00 | 7.4 | 4.8 | 7.8 | 14:00 | 16.4 | 11.3 | 16.6 |
| 10:00 | 10.5 | 10.7 | 10.9 | 15:00 | 15.0 | 13.7 | 15.3 |
| 11:00 | 12.9 | 16.7 | 13.4 | 16:00 | 12.8 | 19.4 | 13.0 |
| 12:00 | 14.6 | 5.1 | 15.0 | 17:00 | 9.8 | 8.5 | 10.0 |

3 小 结

(1) 紫外线强度预报模型考虑了多个因素, 进行云量、高度和气压修正, 突出了低纬高原紫外线辐射强的特点。用模型作晴天紫外线辐射强度预报, 准确度较高, 误差小, 能很好地反映出晴天紫外线辐射强度的变化趋势及其规律; 少云天、多云天与阴天误差大, 这是由于据 Q 实测的 UV 辐射计算值中 Q 值是观测值, 观测时天空状况对 Q 值影响较大, 但总的而言紫外线辐射强度预报值基本上可以反映出紫外线辐射强度的变化情况。

(2) 昆明一年四季紫外线辐射均较强, 冬季晴天紫外线辐射可达 $35 W/m^2$ 左右, 即使在夏季阴天紫外线辐射也可达 $17 W/m^2$ 左右。

(3) 由于本模型不依赖紫外线辐射实测值, 在没有高精度、高准确度的紫外线辐射观测仪器的情况下, 该模型适用性强。

(4) 模型还存在一些问题, 一是模型预报的准确度依赖于气压、气温、露点、云量等因子预报的准确度, 这对模型的准确度有影响; 二是按云量多少来进行云的修正的方法较粗糙。

参考文献:

- [1] Long C S, Miller A J, Hai-Tien Lee, et al. Ultraviolet Index forecasts Issued by the National Weather Service[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77(4): 729-748.
- [2] 陈万隆, 郑有飞, 仲跻芹, 等. 到达地表紫外辐射及其计算方法研究[Z]. “大城市气象服务关键技术及实验示范研究” 1999 年年会, 上海, 1999.
- [3] 陈万隆, 仲跻芹. 预测到大地面紫外辐射的参数化方案的应用研究[Z]. “大城市气象服务关键技术及实验示范研究” 1999 年 9 月北京会议, 北京, 1999.
- [4] 陈万隆. 几种下垫面对紫外线的反射率[J]. 高原气象, 1995, 14(1): 102-106.
- [5] 江 灏, 季国良. 五道梁地区的太阳紫外辐射[J]. 高原气象, 1996, 15(2): 141-146.
- [6] 周 毅. 紫外辐射特性及紫外指数预报方法[J]. 军事气象, 1997(5): 25-30.

Research on the Forecast Model of Radiation Intensity of Ultraviolet Ray

ZENG Yan, WU You-qiao

(Kunming Meteorological Bureau, Kunming 650034, China)

Abstract: A model for predicting the global ultraviolet radiation arriving at the ground surface is developed in this paper on the basis of the parameterization scheme by Chen Wan-long, the height-amending equation of Frederick model and NWS'cloudness-amending equation, and predictions of ultraviolet radiation intensity are performed. Results show that under a clear sky the model can satisfactorily reflect the variational trend of ultraviolet radiation fairly well, and under a complicated sky circumstance such as a part cloudy, cloudy, or over cast sky, the forecast errors are relatively larger, however it can basically reflect the variational trend and law of ultraviolet radiation intensity. The model allows for various influencing factors, and may be applied to the prediction of ultraviolet radiation intensity in cities.

Key words: ultraviolet ray; radiation intensity; forecast; model