

昆明地面生物有效紫外辐照度的初步计算

郭世昌* 杨秀洪

(云南大学地球科学系, 昆明 650091)

邱金桓

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 近年来, 大气平流层臭氧含量普遍呈下降趋势, 这将对人类的生存环境构成极大威胁, 应当引起人们的高度重视。其中, 太阳紫外辐射是一大因素。太阳紫外光 (UVB 和 UVA, 尤其是波长为 280~320 nm) 对动植物生长及人类健康具有重要的生物学效应。但太阳光在大气中的传输过程极其复杂, 涉及到大气臭氧吸收、空气分子散射、气溶胶颗粒以及云滴的散射等作用。针对昆明地处低纬高原, 季风云系影响显著等特点, 本文在同时考虑上述几种情况下, 用二流模式 (two-stream model) 方法对太阳紫外辐射传输问题进行了研究, 得出了一些有意义的计算结果, 并对其作了讨论。

关键词 UV辐照度 二流近似 臭氧垂直分布

1 引言

波长在 280~400 nm 之间的紫外线对人体健康和农作物生长有重要的影响, 通常称其为太阳生物有效紫外辐射。其中 280~320 nm 是 UVB 波段, 是紫外线对动植物产生损害作用最主要的波长区间。320~400 nm 是 UVA 波段, 对动植物的生长也有重要影响。例如, 当植物叶片经 UVB 辐照致损时, 在 UVA 的作用下可以产生修复作用^[1]。据观测表明, 昆明上空近 10 年来大气臭氧总量趋势是持续变薄的。UVB 辐照将增加, 其后果应该引起我们的关注。二流近似是描述有关微粒复杂的辐射传输问题的一种近似计算方法。Ruhl 等^[2]用它研究 UVB 辐射传输与臭氧层的一些相关问题, Meador 等^[3]用它来研究过大气中的辐射传输问题。但都是针对臭氧吸收、Rayleigh 散射、气溶胶粒子散射、云滴散射中某一种或某两种情况而进行讨论的。目前, 虽然有人对这一问题作过一些讨论, 但其中多数是仅作定性的讨论, 如 Kerr 等^[4]就是从实测资料来定性分析说明的。本文则是在比较全面地同时考虑了上述几种作用下, 对它们进行了定量计算并作了较详细的讨论。通过对比分析, 得出了许多有理论价值的结果, 这可使我们研究复杂气候条件下的地面生物有效辐照度, 因而具有重要的意义。

2 模式

由基本的辐射传输方程出发, 经一系列推导^[5]后可得

1995-01-11 收到, 1995-08-20 收到修改稿

* 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测实验室客座研究人员

$$\mu \frac{dI(\tau, \mu)}{d\tau} = I(\tau, \mu) - \frac{\omega_0}{2} \int_{-1}^{+1} I(\tau, \mu') P(\mu, \mu') d\mu' - \frac{\omega_0}{4} F_0 P(\mu, \mu_0) \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mu \frac{dI(\tau, -\mu)}{d\tau} = & -I(\tau, -\mu) + \frac{\omega_0}{2} \int_{-1}^{+1} I(\tau, \mu') P(-\mu, \mu') d\mu' \\ & + \frac{\omega_0}{4} F_0 P(-\mu, \mu_0) \exp\left(-\frac{\tau}{\mu_0}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

其中, μ 是光学质量 (或光学路程), 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$. $+\mu$ 表示向上传输, $-\mu$ 表示向下传输. F_0 是大气层顶的太阳入射辐射度, ω_0 是单次散射反照率, τ 是物质光学厚度. P 为相函数, 在此取 Henyey—Greenstein 相函数^[6]. 其余各量意义同通常规定.

(1), (2) 式对 μ 积分得

$$dI^+ / d\tau = k_1 I^+ - k_2 I^- - \omega_0 F_0 k_3 \exp(-\tau / \mu_0), \quad (3)$$

$$dI^- / d\tau = k_2 I^+ - k_1 I^- + \omega_0 F_0 (1 - k_3) \exp(-\tau / \mu_0). \quad (4)$$

式中: $I^\pm(\tau) = \int_0^1 \mu I(\tau, \pm \mu) d\mu$ 分别表示向上、向下漫射辐射辐射度. 设 $\varepsilon = \sqrt{3} / 2$,

$G = g / (1 + g)$, 则各系数分别为 $k_1 = \varepsilon[2 - \omega'_0(1 - G)]$, $k_2 = \varepsilon\omega'_0(1 - G)$, $k_3 = 0.5\varepsilon(1 - \sqrt{3}\mu_0 G)$, 其中 $\omega'_0 = \omega_0(1 - g^2) / (1 - \omega_0 g^2)$, g 是非对称因子.

单次散射反照率 ω_0 是作为散射辐射重新出现的能量与入射波消失能量之比, 且有: $\omega_0 = \omega_m + \omega_a + \omega_c$, 下标 m 、 a 、 c 分别表示空气分子、气溶胶、云的作用. 在波长 280~400 nm 上, 主要吸收物质是 O_3 , 其他三种粒子吸收作用远较臭氧小, 而散射作用远较臭氧为大, 故吸收物质仅考虑臭氧, 散射物质为空气分子、气溶胶和云粒子. 所以有

$$\omega_m = \beta_m / (\beta_0 + \beta_m + \beta_a + \beta_c),$$

$$\omega_a = \beta_a / (\beta_0 + \beta_m + \beta_a + \beta_c),$$

$$\omega_c = \beta_c / (\beta_0 + \beta_m + \beta_a + \beta_c),$$

其中 β_0 是臭氧吸收系数, $\beta_m, \beta_a, \beta_c$ 分别为空气分子, 气溶胶粒子和云滴的体散射系数. 设方程组 (3), (4) 的边界条件为

$$I^-(0) = 0 \quad \text{和} \quad I^+(\tau) = 0, \quad (5)$$

即气层顶边和底边无漫射辐射进入, 则解 (3), (4) 可得漫反射率 R' 和漫透射率 T' , 得

$$R' = Y[\alpha_3 C_1 e^{k\tau} - \alpha_4 C_2 e^{-k\tau} - C_3 e^{-\tau/\mu_0}], \quad (6)$$

$$T' = Y[\alpha_3 C_4 e^{-k\tau} - \alpha_4 C_5 e^{k\tau} + C_6 e^{\tau/\mu_0}] \exp(-\tau / \mu_0), \quad (7)$$

其中

$$C_1 = \alpha_2 + k k_3, \quad C_2 = \alpha_2 - k k_3, \quad C_3 = 2k(k_3 - \alpha_2 \mu_0),$$

$$C_4 = \alpha_1 - k + k k_3, \quad C_5 = \alpha_1 + k - k k_3, \quad C_6 = 2k(1 - k_3 + \alpha_1 \mu_0),$$

$$\alpha_1 = k_2 k_3 + k_1(1 - k_3), \quad \alpha_2 = k_1 k_3 + k_2(1 - k_3), \quad \alpha_3 = 1 - k \mu_0,$$

$$\alpha_4 = 1 + k \mu_0, \quad k^2 = k_1^2 - k_2^2,$$

$$Y = \omega_0 / [(1 - k^2 \mu^2)(k + k_1)e^{k\tau} + (k - k_1)e^{-k\tau}].$$

在 (3)、(4) 式中, 如果不考虑直接辐射分量而只考虑漫射部分, 此时的边界条件为

$$I^+(\tau') = 0, \quad (8a)$$

$$I^-(0) = \pi F_0 \mu_0 = \alpha F(\tau^*) = \alpha [F' \mu_0 \exp(-\tau_n / \mu_0) + F_d(n)], \quad (8b)$$

其中, α 为所考虑地区地表反照率; $F(\tau^*)$ 为近地层大气向下太阳辐射量; $F_d(n)$ 为近地层大气的向下散射辐照度; F' 为近地层向下的一次散射辐照度。于是 (3)、(4) 式可改写为

$$\frac{dI^+}{d\tau} = k_1 I^+ - k_2 I^-, \quad (9)$$

$$\frac{dI^-}{d\tau} = k_2 I^- - k_1 I^+, \quad (10)$$

解此方程, 同理可得前向散射率 T 和反向散射率 R , 得

$$R = k_2(1 - e^{-2k\tau}) / [k + k_1 + (k - k_1)e^{-2k\tau}], \quad (11)$$

$$T = 2ke^{-k\tau} / [k + k_1 + (k - k_1)e^{-2k\tau}]. \quad (12)$$

对于直接辐射分量透射率 $T' = \exp(-\tau / \mu_0)$, 通过反射率和透射率以及其他一些参考资料即可进行辐射传输的有关计算了。

3 计算过程及资料处理

据逆转方法〈C〉测得的昆明近 10 年来冬、春季的臭氧垂直分布资料^[7]可知, 在距海平面 50 km 处臭氧浓度很低, 此高度空气也非常稀薄, 气溶胶粒子浓度更小, 而云主要在对流层。考虑以上情况, 取 52 km 处为模式大气层顶。因高云多由冰晶组成, 冰晶的散射过程目前尚难确定, 故这里仅考虑中、低云系。据此将大气从 0 到 15 共分为 16 层, 其分层范围分别是 0~3, 3~5, 5~10, 10~14, 14~18, 18~21, 21~25, 25~28, 28~32, 32~36, 36~39, 39~42, 42~45, 45~48, 48~50 和 50~52 km。由此建立起各层次之间的辐射传输相互关系式如图 1 中所示, 其中 $F^+(j)$, $F^-(j)$ 是第 j 层向上与向下太阳散射辐照度, $R(j)$, $T(j)$ 是第 j 层大气的总透射率和反射率, $F_{j-1,j}$, $F_{j+1,j}$ 分别是第 j 层向上与向下的一次散射辐照度。

对臭氧来说, 由昆明冬、春季的平均臭氧分压和温度垂直分布轮廓线, 可读出各高度对应的分压和温度, 进而可得臭氧分子数密度 (浓度) N (cm^{-3}) 及其垂直分布。对于空气, 我们采用昆明近几年的探空资料^[8], 用类似方法可求得空气分子的数密度及其垂直分布。臭氧的吸收截面和空气分子 Rayleigh 散射截面 σ_s 的值取自文献^[9]。计算中各波段的划分也与文献^[9]一致, 从 280~400 nm 范围内共得出 25 个波段。由于气溶胶的成分、浓度和谱分布随时间、地点和高度而变化, 根据昆明地处低纬高原等特点,

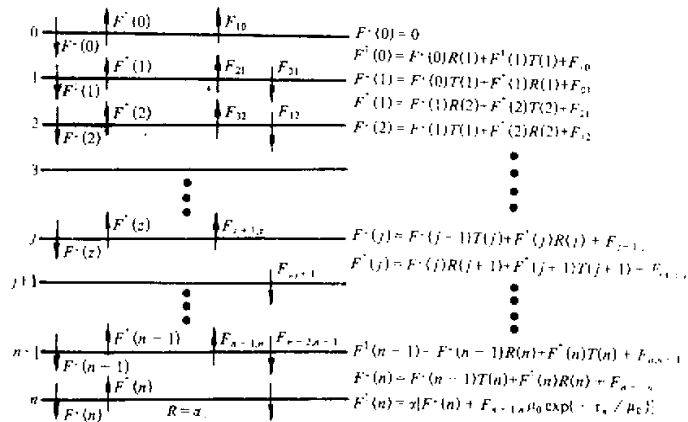


图1 模式大气的分层结构与各层次之间的相互关系式

取其大陆型气溶胶, 其粒子尺度谱分布函数采用 Junge 幂指数分布^[10], 所考虑粒子尺度范围内地面总的粒子浓度 N_0 为

$$N_0 = \int_{r_1}^{r_2} n(r) dr = 0.4343c \int_{r_1}^{r_2} r^{-(v+1)} dr. \quad (13)$$

Eltzman 曾提供过气溶胶粒子垂直分布廓线, 本文则假定它是由地面到高空按指数分布的, 即 $N(Z) = N_0 \exp(-Z/HP)$, N_0 为地面浓度, HP 是气溶胶标高, HP 在 1~1.4 km 之间变动, 而 1.2 km 是一个合适的平均值。取平均折射指数为 1.55。至于云, 因资料所限, 现仅考虑冬、春两季的情况, 假定云内各部分是完全的漫散射。昆明多年的云观测和探空资料表明, 取高层云和层积云分别代表中云和低云较为合适。设两种云间隙被忽略, 都为平面平行云层。中云云底高度取为 3 km, 云厚取 1.0 km, 低云云底高度取为 1.5 km, 云厚为 0.5 km。云内云滴的尺度分布谱为修正伽玛函数^[11], 具体云型及其粒子尺度分布谱同文献[11], 并假设两种云内的粒子数密度值不随高度而变化。对气溶胶和云而言, 其散射系数 β_{sa} , β_{sc} 为 $\beta_s = \int \pi r^2 K_s n(r) dr$, 其中 K_s 是消光效率因子^[12]。

$$K_s = [2 - 4\rho^{-1} \sin \rho + 4\rho^{-2} (1 - \cos \rho)] \times [1 + (M_r - 1)/M_r], \quad (14)$$

式中, $\rho = 4\pi r(M_r - 1)/\lambda$, M_r 是粒子折射指数, λ 是波长。计算所需的大气层顶的太阳光入射辐照度 F_0 取自文献[13]。非对称因子 g 是粒子尺度的函数, 它随不同的粒子有不同取值。这里就取其一个参考值 0.75 作为代表进行计算。太阳天顶角的余弦为

$$\mu_0 = \cos(\theta) = \sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega). \quad (15)$$

式中 θ , δ , φ , ω 分别是太阳天顶角、太阳赤纬、测站纬度和时角。本文仅考虑昆明两分两至点的太阳赤纬值, 且均为正午时间, 即 $\omega = 0$ 。由此可算出各层大气中的空气密度, 臭氧浓度和 β_0 , β_m , β_a , β_c , 以及 R' , T' 和 R , T 。表 1 列出了部分计算结果。

表 1 各波段各层上的部分参数计算结果*

波长	285 nm			350 nm		
分层	0~3 km	21~25 km	32~36 km	0~3 km	21~25 km	32~36 km
R'	0.76×10^{-2}	0.58×10^{-4}	0.19×10^{-3}	0.60×10^{-2}	0.21×10^{-1}	0.13×10^{-2}
T'	0.60×10^{-1}	0.91×10^{-4}	0.16×10^{-2}	0.74×10^{-1}	0.57×10^{-1}	0.32×10^{-1}
T	0.64×10^{-3}	0.48×10^{-4}	0.16×10^{-4}	0.83×10^{-3}	0.16×10^{-2}	0.94×10^{-1}
R	0.70×10^{-5}	0.16×10^{-6}	0.26×10^{-5}	0.96×10^{-1}	0.98×10^{-1}	0.97×10^{-1}
ρ_a	1.061	0.067	0.012	1.061	0.067	0.012
ρ_s	0.009	0.102	0.055	0.009	0.102	0.055
β_a	0.31×10^5	0.35×10^6	0.19×10^6	0.29×10^1	0.34×10^2	0.18
β_m	0.17	0.01	0.002	0.08	0.004	0.0007
β_s	0.29×10^{-3}	0.72×10^{-2}	0.75×10^{-11}	0.21×10^{-3}	0.69×10^{-1}	0.79×10^{-11}
β_c	0.347×10^3			0.351×10^3		

* 密度及减弱系数的单位分别为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 km^{-1}

在图 1 所示大气分层计算模式中:

$$F_{n-1,n} = T'(n)F'\mu_0 \exp(-\tau_n / \mu_0), \quad (16)$$

$$F_{n+1,n} = R'(n)F'\mu_0 \exp(-\tau_n / \mu_0), \quad (17)$$

分别表示第 n 层向下与向上的一次散射辐照度。由各层之间的相互关系式采用全主元高斯消去法, 解联立方程组, 得

$$F_E(I) = F_n(I) + F'(I). \quad (18)$$

由于计算中引入了一些近似假设, 所得的解是一个近似解。为减小这种误差, 采用了文献[14]给出的经验性关系式 $\beta' = \beta_0(1 - \omega_0 f)$, $\tau' = (1 - \omega_0 f)\tau$ 。

4 计算结果与分析

图 2 给出了计算得出的春分正午时昆明地面所获太阳生物有效紫外辐照度, 图中的

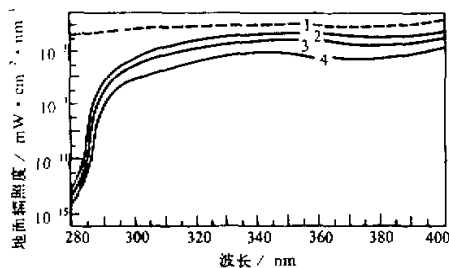


图 2 春分正午时昆明地面生物有效紫外辐照度
1. 大气层顶处 UV 辐照度, 2. 计入 O_3 、空气分子时的结果, 3. 计入 O_3 、空气分子及气溶胶的结果, 4. 再计入云作用后的结果

地面辐照度与波长的对应图是曲线拟合图。虚线 1 表示 280~400 nm 各波长所对应的大气层顶太阳入射辐照度, 曲线 2 表示洁净大气中仅考虑臭氧吸收和 Rayleigh 散射的地面辐照度。曲线 3、4 分别为在考虑上述前提下加入气溶胶和云粒子散射后的计算结果。

从图 2 可以看出, 在 280~320 nm 波长上太阳辐射通过大气层时受到极大削弱, 尤其是在 300 nm 波长以下几乎可以忽略不计它到达地面的辐射量。

考虑洁净大气时, 由曲线 2 可看

出、UVB 辐射受到极大削弱，其原因是大气臭氧的两个强吸收带主要集中在这一波长范围内。320 nm 以上波段内被削弱量较前者小得多，且其削弱效果随波长变化基本无关。曲线 3 是考虑 Rayleigh 散射、臭氧吸收、气溶胶散射情况下的结果，曲线 3 与曲线 2 变化趋势基本一致。由此可见，气溶胶粒子对 UV 辐射传输有较大影响。曲线 4 是在全面考虑了臭氧吸收、Rayleigh 散射、气溶胶粒子和云滴的散射作用下所得结果。考虑云的作用后，可见曲线 4 较曲线 3 明显为低，它大约是在气溶胶曲线上再削弱 40% 左右，这说明云的作用与气溶胶的光学性质有很大差别，一般云的光学厚度比起气溶胶要大很多。而且几乎所有波长都受到较大削弱，削弱程度相当。由此可看出云的作用对太阳辐射传输来说也是很重要的。

通过改变臭氧浓度和空气分子密度来对比分析臭氧吸收和空气分子散射对 UVB、UVA 削弱作用的相对贡献大小可知，长于 320 nm 的 Rayleigh 散射作用相对显得重要一些，但在短于 300 nm 臭氧吸收作用就占绝对优势，使得该波段内的辐照度甚微，且随海拔高度和测站纬度不同，地面辐照度也不同。臭氧总量在不同季节、不同年份里有一些差异，图 3 给出了昆明两分两至时间里正午时的地面生物有效光谱辐照度。

从图 3 可以看出，在各季中，300 ~ 320 nm 波段内遵循着冬季较强、春秋季节较弱的特点，这说明冬季并不一定紫外辐射就弱，故即使是在冬季也不宜长期在阳光下暴晒。各季总的差异在 B 波段表现最为明显，这主要是由于在该波段内臭氧吸收作用占绝对优势，而昆明冬季臭氧含量相对较低所致。本文计算了昆明冬至晴天清洁大气臭氧总量减少 10%（或 5%）、臭氧减少 10%（或 5%）而气溶胶粒子浓度增大 2（或 3）倍以及云层厚度改变时地面所获光谱辐照度有何变化，结果由表 2 所示。

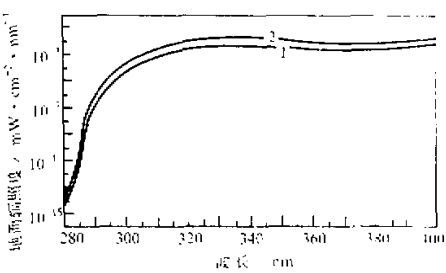


图 3 昆明两分两至时间里正午时
地面生物有效紫外辐照度
1 春(秋)分; 2 冬至

表 2 昆明冬至晴天臭氧、气溶胶浓度、地面反照率与云层厚度变化时
地面紫外光谱辐照度相对正常情形下的变化百分率 (%)

波 长 / nm	285	290	300	310	320	350	380	400
O ₃ (-10%)	365.9	91	30.6	12.2	3.4	0.44	0.26	0.33
O ₃ (-5%)	117.5	39.4	15.1	6.8	2.2	0.48	0.19	0.24
O ₃ (-10%) 2 倍气溶胶	360	89	28.6	11.1	3.0	0.55	0.20	0.24
O ₃ (-5%) 3 倍气溶胶	114.2	37.3	13.3	5.3	1.5	0.27	0.09	0.12
地面反照率 2.0	0.65	0.31	0.07	0.02	0.1	3.7	4.4	4.5
云层厚度增加 1 倍	37.6	32.3	29.0	27.8	27.1	27.5	27.7	27.9

由表 2 可看出，臭氧减少时，地面辐照度将增加，且波长越短，增幅越大。比如在晴天清洁大气中臭氧总量减少 10% 时，使得 320 nm 以下波长的辐照度值都有所加强，

尤其是在 300 nm 以下更加剧烈。例如在 285 nm 处, 辐射度增加了 365.9%, 而在 300 nm 处只增加了 30.6%, 在 400 nm 处的增加量还不到 0.5%。且臭氧减少比例与地面辐照度增加的比例并不成线性关系 (见表 2)。这主要是由于在该波段内大气臭氧的贡献占绝对优势地位, 它的极小变化都将对大气中的紫外辐射传输带来较大影响。由表 2 还可知, 气溶胶浓度的增加也将影响地面所获得的光谱辐照度值, 但如果仅是气溶胶浓度变化而其他条件不变的话, 则计算表明其影响是微不足道的。这是由于气溶胶的消光作用相对另外三者要小的缘故。若让臭氧浓度减少 10% 的同时, 气溶胶粒子浓度增大 2 倍, 则会对因大气臭氧浓度减少造成地面有效辐照度的增加作用有所抵制, 但其抵制作用比较小。在 330nm 波长以上, 其影响相对要大一些, 主要是在此范围内臭氧吸收作用不再占重要位置了。在表 2 中计算了云层厚度改变时辐照度值的变化百分率。可见, 云厚由 1.0 km 增加到 2.0 km 时, 在各波长上都受到较大削弱, 如在 285 nm 上变化幅度为 37.6%, 在 320 nm 上变化率为 27.1%, 而在 400 nm 上为 27.9%, 故云对太阳辐射传输的削弱作用不可忽略。

参 考 文 献

- 1 Whitten, R.C and S.S.Prasad. 1985, Ozone in the free atmosphere, VNR, Company, New York, 273~274.
- 2 Ruhl, C.B and P.J.Crutzen. 1989, On the Disproportionate Role of Tropospheric Ozone As a filter Against solar UVB Radiation, *Geophys. Res. Lett.*, 16, 703~706.
- 3 Meador, W.E. and Weaver, W.R.1980, Two stream approximation to existing methods and a new improvement. *J. Atmos. Sci.*, 37, 630~643.
- 4 Kerr J.B. and C.T.McElroy. 1993, Evidence for Large Upward Trends of Ultraviolet Radiation Linked to Ozone Depletion., *Science*, 262.
- 5 刘长盛, 刘文保, 1990, 大气辐射学, 南京大学出版社, 257~269.
- 6 刘长盛, 刘文保, 1990, 大气辐射学, 南京大学出版社, 246~250.
- 7 王卫国、郭世昌、杨利群, 1990, 大气臭氧层的垂直分布及其变化的研究, *地球物理学报*, 33 (6), 639~645.
- 8 中国气象局, 1980~1987. 中国高空气象记录月报, 气象出版社.
- 9 WMO, 1985, Global Ozone Research and Monitoring Project, *World Meteorological Organization Report*, No.6, 355~362.
- 10 Junge, C.E., Robinson, E and Ludwig, F.L., 1969, A study of aerosols in Pacific air masses, *J. Appl. Meteorol.*, 340~347.
- 11 Deirmendjian, D., 1964, Scattering and polarization properties of water clouds and hazes in the visible and infrared, *Appl. Opt.*, 3, 187~196.
- 12 E.J. 麦卡特尼, 1988, 大气光学 / 分子和粒子散射, 科学出版社, 268~271.
- 13 C. 弗勒利希, J. 伦敦编, 王炳忠、吕文华译, 1991, WCRP>JSC, WMO / ICSU, 辐射仪器 and 测量手册, 气象出版社, 140~147.
- 14 刘长盛, 刘文保, 1990, 大气辐射学, 南京大学出版社, 310~324.

A Preliminary Calculation on the Surface Biologically-Active UV Irradiance for Kunming by the Two-Stream Approximation

Guo Shichang and Yang Xiuhong

(Earth Science Department, Yunnan University, Kunming 650091)

Qiu Jinhuan

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract Recent reports of the stratospheric ozone depletion have caught concerns about the levels of solar ultraviolet radiation at the earth's surface. A preliminary calculation on the surface biologically-active UV irradiance (UVB and UVA) in Kunming area, using a two-stream model, is described in this paper. In the model, the influences of ozone absorption, Rayleigh scattering, cloud droplet scattering, aerosol scattering and their seasonal variations are considered. Finally, the calculated results including spectral and integral surface irradiances are discussed.

Key words UV irradiance two-stream approximation O_3 vertical distribution