

大气中的水汽对太阳紫外辐射消光的可能机制分析

白建辉 王庚辰

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

提 要

本文给出了北京地区晴天和实际天气条件下到达地面太阳紫外总辐射的一种计算方法, 分析了影响到达地面太阳紫外总辐射的各主要因子的主次贡献, 重点讨论了水汽在参与大气中的光化学反应过程中, 对到达地面的太阳紫外总辐射消光的可能机制。

关键词: 水汽; 太阳紫外辐射; 光化学反应。

一、引 言

目前, 由于大气臭氧总含量的减少, 可能引起到达地面的太阳紫外辐射增加, 以及由此产生的一系列生态、环境、医疗等方面的效应, 已引起有关部门和国内外学者的注目。一般认为, 臭氧对太阳紫外波段的辐射有强烈的选择性吸收, 如哈特莱(Hartley)带和赫金斯(Huggins)带。由于水汽对太阳紫外波段辐射没有直接吸收, 所以, 通常认为影响到达地面的太阳紫外辐射的主要因子有: 大气臭氧、大气浑浊度、云量、地表反照率等, 其中臭氧是最主要的因子。但也有研究者认为, 太阳紫外辐射对大气浑浊度和地表反照率变化的敏感性优于对臭氧总量变化的敏感性^[1]。本文的目的是评价各因子对到达地面的太阳紫外总辐射的主次贡献, 并重点讨论大气中的水汽对太阳紫外总辐射消光的可能机制。

二、太阳紫外总辐射的统计计算结果

从辐射传输的基本概念出发, 影响到达地面的太阳紫外辐射的主要因子有: (1)臭氧对太阳紫外总辐射的选择吸收, 此项用 $e^{-K_1 q m}$ 表示, 其中 K_1 是臭氧对太阳紫外总辐射($\lambda = 390.2 - 434.20 \text{ nm}$)的平均吸收系数, $K_1 = 3.26 \text{ cm}^{-1}$, O_3 为垂直气柱内总臭氧含量, m 为大气质量; (2)气溶胶对太阳紫外总辐射的散射、空气分子的散射以及地表反照率对太阳紫外总辐射的影响, 此项用 $e^{-D/S}$ 来表示, 这里 D 是水平面太阳散射辐射曝辐量, S 是水平面太阳直接辐射曝辐量。我们认为 $e^{-D/S}$ 能较好地反映气溶胶、空气分子及地表反照率等对太阳紫外总辐射的综合影响, 因为 D/S 可以作为大气中悬浮粒子

或大气浑浊状况的一个指标^[2,3], 并且 D/S 因子与林克浑浊因子的变化趋势是一致的, 在某种程度上也确实要敏感些^[4]; (3)水汽的影响, 此项用 $Ae^{-K_2 Wm}$ 表示, W 是整层大气的可降水量, 可根据地面观测的地面水汽压值由经验公式求得, K_2 表示水汽对太阳总辐射($\lambda=0.70-2.845\mu m$)的平均吸收系数, A 为经验系数。实际计算中, 此项由经验公式求得。

为了分析晴天条件下, 影响到达地面的太阳紫外总辐射的三个主要因子的主次贡献, 我们采用相关分析方法, 利用 F 检验, 得到结论: 晴天条件下, 决定到达地面的太阳紫外总辐射月平均日总量的最主要因子是臭氧, 其次是水汽, D/S (为方便, 以下简称气溶胶) 的贡献最小。它们的 F 检验值分别为 67.2, 10.8, 0.86。查 F 检验表可得, $F_{1,8}^{0.01} = 11.26$, $F_{1,8}^{0.05} = 5.32$, $F_{1,8}^{0.10} = 3.46$, 可以看到, 臭氧因子在置信度 $\alpha=0.01$ 的水平上高度显著相关, 水汽因子在置信度 $\alpha=0.05$ 的水平上显著相关, 而气溶胶因子相关很不明显。由此相关分析, 确定了计算晴天到达地面太阳紫外总辐射的一个非线性回归方程中的各系数及常数项, 即

$$Q_{uv} = A_1 e^{-K_1 qm} + A_2 e^{-K_2 Wm} + A_3 e^{-D/S} + A_0, \quad (1)$$

式中, A_1 、 A_2 、 A_3 等均为常系数, A_0 为常数。为评价各因子的主次贡献, 用公式(1)计算地面太阳紫外总辐射曝辐量时, 分 3 种情况进行, 这 3 种情况是:

第1种情况: $Q_{uv} = A_1' e^{-K_1 qm} + A_0'$,

第2种情况: $Q_{uv} = A_1'' e^{-K_1 qm} + A_2'' e^{-K_2 Wm} + A_0''$,

第3种情况: $Q_{uv} = A_1 e^{-K_1 qm} + A_2 e^{-K_2 Wm} + A_3 e^{-D/S} + A_0$ 。

用以上 3 种形式的公式分别计算了 1990 年 12 个月晴天 (云量 $N \leq 2$ 的天气) 到达地面太阳紫外总辐射曝辐量的月平均日总量, 计算结果见表 1, 表 1 中还给出每种情况计算值与观测值的相对偏差(δ)、相关系数(R)、标准差(σ)。

采用与晴天相同的分析方法, 处理了 1990 年 12 个月实际天气条件下的观测资料, 得到了与晴天基本相同的结论: 实际天气条件下, 决定到达地面的太阳紫外总辐射月平均日总量的最主要因子是臭氧, 其次是水汽, D/S 的贡献最小。它们的 F 检验值分别为 116.4, 13.6, 1.99。查 F 检验表可得 $F_{1,8}^{0.01} = 11.26$, $F_{1,8}^{0.05} = 5.32$, $F_{1,8}^{0.10} = 3.46$, 可以看到, 臭氧因子和水汽因子均在置信度 $\alpha=0.01$ 的水平上高度显著相关, 而气溶胶因子相关很不明显, 并得到形式同公式(1)完全一样的回归方程, 按与晴天一样的三种情况进行了计算, 计算结果见表 2。

三、大气水汽含量与太阳紫外辐射统计关系分析

从表 1 和表 2 中可以看到, 计算值与观测值符合得很好, 平均相对偏差都较小。如表 1 和表 2 中的第(c)种情况, $\bar{\delta}$ 值分别为 3.62% 和 3.02%。只有个别月份相对偏差较大, 有 6 个月份 δ 值小于 3%。图 1 给出晴天三种形式公式计算的相对偏差, 从表 1 和图 1 可以发现, 只考虑天顶角余弦时, 计算精度最低, 最大相对偏差较大, 约为 13.1%, $\bar{\delta}$ 值为 5.83%; 若加上水汽因子后, 计算精度大为提高, 最大相对偏差降为

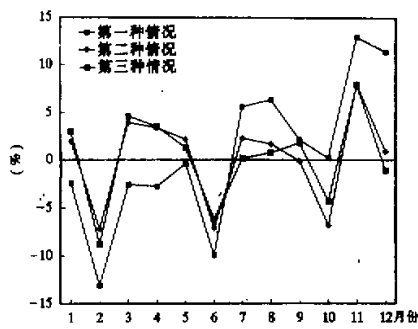


图 1 相对偏差的比较

8.02%， $\bar{\delta}$ 值也降为 3.80%；三个因子全部考虑后，计算精度最高， $\bar{\delta}$ 值为 3.62%，最大相对偏差为 8.78%。

由相关分析和计算结果可以得到一个结论，水汽因子对到达地面的太阳紫外总辐射起着重要的作用，但水汽对太阳紫外总辐射没有直接吸收，这是众所周知的。很明显，可能有一个重要方面被我们长期忽略了，现在应该引起重视。下面主要讨论一下水汽因子项代表的真实含义。我们认为此项表示的是大气中各种气体参与光化学反应(均相、非均相)过程中，对太阳紫外总辐射的总吸收。

四、大气中光化学过程对太阳紫外总辐射的吸收

大气中的大多数均相化学过程都直接或间接地与太阳紫外辐射的大气吸收有关，即大气中的均相化学过程都与光化学反应有关^[9]。大气化学转化过程中，一种最为关键的成分是 OH 自由基。当臭氧分子吸收了波长小于 315nm 的太阳辐射时，光解产生一个激发态氧原子 $O(^1D)$ ， $O(^1D)$ 与水分子碰撞并发生反应而生成 OH 自由基。很多实验证明，OH 自由基是 H_2O 间接地吸收了太阳紫外辐射产生的。在大气中，OH 基参加的光化学反应有很多，其中又有很多反应过程对太阳紫外辐射能量有吸收。例如，甲烷氧

表 1 晴天地面太阳紫外总辐射月平均日总量 (MJ/m^2) 的观测值、计算值及相对偏差(%)

月 份	观 测 值	计 算 值 及 相 对 偏 差					
		第 1 种情况		第 2 种情况		第 3 种情况	
		计算值	δ (%)	计算值	δ (%)	计算值	δ (%)
1	0.95	0.92	-2.38	0.97	1.94	0.98	2.99
2	1.27	1.10	-13.10	1.18	-7.18	1.16	-8.78
3	1.37	1.33	-2.57	1.42	3.92	1.43	4.60
4	1.48	1.44	-2.76	1.53	3.38	1.53	3.54
5	1.54	1.54	-0.42	1.58	2.19	1.56	1.29
6	1.65	1.49	-9.96	1.53	-7.08	1.55	-6.19
7	1.52	1.61	5.60	1.55	2.28	1.52	0.15
8	1.48	1.58	6.38	1.51	1.70	1.49	0.75
9	1.44	1.48	2.17	1.44	-0.09	1.47	1.81
10	1.36	1.36	0.19	1.27	-6.84	1.30	-4.34
11	0.98	1.11	13.02	1.06	8.02	1.06	7.93
12	0.82	0.92	11.45	0.83	0.92	0.81	-1.07
$\bar{\delta}$			5.83		3.79		3.62
R		0.933		0.970		0.973	
σ		0.100		0.071		0.072	

表 2 实际天气地面太阳紫外总辐射月平均日总量 (MJ/m^2)
的观测值、计算值及相对偏差 (%)

月 份	观 测 值	计 算 值 及 相 对 偏 差					
		第 1 种情况		第 2 种情况		第 3 种情况	
		计算值	δ (%)	计算值	δ (%)	计算值	δ (%)
1	0.72	0.70	-2.56	0.73	1.27	0.73	0.88
2	0.92	0.86	-6.15	0.90	-2.20	0.89	-3.45
3	1.05	1.04	-0.91	1.09	3.95	1.08	3.29
4	1.17	1.13	-3.39	1.20	2.36	1.20	2.75
5	1.27	1.20	-5.77	1.24	-2.67	1.26	-0.76
6	1.26	1.19	-5.61	1.22	-3.27	1.23	-2.85
7	1.22	1.26	3.07	1.24	1.22	1.20	-1.93
8	1.22	1.25	2.09	1.21	-0.73	1.21	-1.23
9	1.10	1.18	7.41	1.14	3.93	1.15	4.80
10	1.06	1.08	1.51	1.01	-4.97	1.03	-2.65
11	0.75	0.87	16.55	0.81	8.05	0.80	6.89
12	0.71	0.69	-2.22	0.67	-5.57	0.67	-4.71
$\bar{\delta}$			4.77		3.35		3.02
R		0.960		0.984		0.987	
σ		0.063		0.042		0.040	

化的光化学过程, 氮氧化物的光化学反应过程, 硫化物的光氧化过程, 平流层的 Cl_2 、 HCl 、 ClOO 、 ClO_3 等的光分解过程, 因反应种类和数量太多, 此处不再赘述。大量实验表明, 大气中的各种光化学反应, 臭氧的产生和破坏等都与大气中的水汽, OH 、 H 、 HO_2 、 H_2O_2 等自由基有关。而前面所说的水汽因子项, 实际上是大气中的各种物质在光化学反应过程中对到达地面的太阳紫外总辐射的吸收项, 以后简称光化学项。

然而如何表示水汽参与的光化学反应使太阳紫外辐射受到的衰减是一个难题。考虑到实际大气中太阳紫外总辐射与太阳总辐射之间的统计关系, 我们把水汽参与的光化学反应过程中吸收的太阳紫外辐射的总量通过水汽对太阳总辐射的吸收间接地表达出来, 并按照太阳辐射在大气中传输的基本规律, 此项用 $Ae^{-K_2 W^m}$ 表示, K_2 为水汽对太阳总辐射 ($\lambda=0.70-2.845 \mu\text{m}$) 的平均吸收系数, W 为整层大气水汽含量, 其值由地面水汽压(E)通过经验公式计算而得, m 为一天之中正午时刻的大气质量, 本文中 $e^{-K_2 W^m}$ 由经验算法计算得到, A 为经验常数, 表征大气中的各种光化学反应中对所吸收的太阳紫外辐射能量与水汽吸收的太阳总辐射能量之比。这种表示方法的基本假定是到达地面的太阳紫外辐射与太阳总辐射之比是一个常数, 并且各因子的贡献结果不影响这个比值。实际上, 这一假定已从很多研究结果得到证实^[6, 7], 我们在香河站 1990 和 1991 年的太阳分光辐射的观测结果也可证明上述假定是成立的^[8], 因此有另一假定, 大气中水汽参与的各种物质在光化学反应中对太阳紫外辐射的吸收(Q'_{uv})与水汽对太阳总辐射的吸收(Q')之间同太阳紫外辐射与太阳总辐射之间一样有一种比较稳定的定量关系存在, 即 $Q'_{uv}/Q'=A$, A 值大小由相关分析确定。对香河站 1990 年和 1991 年两年晴天和实际天气的观测资料分析处理后, 发现 A 值基本上是一个常数。1990 年和 1991 年晴天 A 值分别为 1.41, 1.50; 1990 年和 1991 年实际天气的 A 值分别为 1.69 和 1.79。这样我们就

可以将光化学项间接地求出来了。

五、结 论

(1) 晴天和实际天气条件下, 北京地区影响到达地面的太阳紫外总辐射月平均日总量最主要因子是臭氧, 第二位主要因子是光化学项, 它们都在置信度 $\alpha=0.05$ 的水平上显著相关, 气溶胶项相关很不明显。

(2) 大气中的水汽对到达地面的太阳紫外辐射变化有重要的影响, 这种影响可能是通过大气中与水汽有关的各种光化学过程来实现的。

参 考 文 献

- [1] Nagaraja Rao C.R. et al., 1984, Near ultraviolet radiation at the earth's surface, measurements and model comparison, *Tellus*, 36B, 286—293.
- [2] 周淑贤等, 1987, 上海城市地区对太阳辐射的影响, *地理学报*, 42, 第 4 期, 319—327.
- [3] Marvin, L. et al., An experiment study of the effects of aerosols on diffuse and direct solar radiation received during the summer near Chicago, *Atmos. Environ.*, 10, 981.
- [4] 邵德民, 1982, 大气湍流扩散及污染气象论文集, 气象出版社, 100—108.
- [5] 王明星, 1991, 大气化学, 气象出版社, 48.
- [6] 周允华, 1986, 中国地区的太阳紫外辐射, *地理学报*, 41, 第 2 期, 132—143.
- [7] 季国良等, 1985, 青藏高原的紫外辐射, *高原气象*, 4, 第 4 期, 112—121.
- [8] 白建辉, 1992, 太阳紫外辐射的变化及其气候学计算方法, 中国科学院大气物理研究所硕士论文.

A Possible Extinction Mechanism of Solar Ultraviolet Radiation by Water Vapour in the Atmosphere

Bai Jianhui and Wang Gengchen

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

Abstract

A method of calculating the solar ultraviolet radiation reaching the ground over Beijing area is proposed, and the primary and secondary contribution of dominant factors affecting the solar ultraviolet radiation reaching the ground surface under the clear sky condition and actual sky condition are analysed. Possible extinction mechanism of the solar ultraviolet radiation reaching the earth's surface by water vapour which takes part in the most atmospheric photochemical reactions is discussed in detail.

Key words: water vapour; solar ultraviolet radiation; photochemical reaction.