

近 20 年北京晴天紫外辐射的变化趋势^{*}

白建辉^{1,2)}

王庚辰²⁾

胡 非¹⁾

1) (中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

2) (中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测开放实验室, 北京 100029)

摘 要 在对北京晴天 1990 年 1 月 ~ 1991 年 12 月太阳辐射观测资料进行了详细分析的基础上, 得到了计算晴天紫外辐射的计算公式, 结果表明, 计算值与观测值吻合得比较好, 计算值与观测值的最大相对偏差为 6.2%, 24 个月相对偏差的平均值为 1.9%。利用此公式计算了北京晴天 1979 ~ 1998 年的紫外辐射, 并给出了 1979 ~ 1998 年紫外辐射的变化趋势, 发现近 20 年北京地区晴天的紫外辐射呈下降趋势, 并对其产生原因以及影响紫外辐射的各个因子进行了详细分析。

关键词: 紫外辐射; 臭氧; 水汽; 气溶胶; 污染物

1 引言

太阳紫外辐射, 由于其强烈的生物、化学效应, 对人类健康、大气环境具有重要影响, 整层大气臭氧下降可能带来地面紫外辐射的上升, 将导致一系列严重的危害。平流层臭氧减少导致对流层紫外辐射上升, 这将加快对流层光化学过程, 造成二次污染物增加, 空气质量恶化, 因此紫外辐射的研究对于人类健康和生存环境具有重要意义。近二三十年世界各地紫外辐射的变化趋势是一个值得研究的问题, 因为它不仅涉及生物、医学、环境科学方面的学术问题, 更重要的是与人体健康、动植物生长、大气质量等实际问题密切相关, 特别是对人口密集的大城市、对紫外辐射敏感的人群而言。

辐射传输模式可用于计算紫外辐射及其变化趋势, 它需要知道大气顶部的入射辐射。模式的输入参数需要以臭氧的卫星观测资料为基础, 然后将其应用到全球, 其优点是费用相对较少, 并可以应用到任何地理位置, 但目前模式研究一直被限制于晴天, 且依赖于模式所需数据的获得^[1]。模式结果的不确定性主要在于测量的臭氧总量、气溶胶光学厚度等, 如果测量实际天气近地面臭氧、SO₂、气溶胶光学厚度等参数, 并应用于模式中, 则由于输入参数不确定性带来计算结果的不确定性约为 5%^[2]。

紫外辐射的长期、连续监测很少, 常规高质量的分光观测开始于约 10 年前, Robertson-Berger 宽波段型仪器 (简称 RB 表) 的设计不是用于监测长期变化, 而主要是用于模拟人类皮肤对紫外 B 波段辐射 (简称 UVB) 的敏感性^[3]。Scott 等^[4]利用此仪器对 1974 ~ 1985 年美国 8 个站紫外辐射的观测表明, 此期间紫外辐射呈下降趋势。在

2001 - 03 - 28, 2002 - 03 - 25 收到三改稿

^{*} 国家自然科学基金资助项目 40175031、中国科学院知识创新工程项目 KZCX2 - 204 和中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室 KF - 2002 - 02 项目共同资助

一些无污染地区，如瑞士阿尔卑斯山、新西兰、波兰，RB 表的观测结果表现出上升趋势^[5]。利用 RB 表来监测紫外辐射长期变化在不同地区出现矛盾的结果，除了与这些地区气溶胶（大气浑浊度）、云等的变化特点有关外，还与 RB 表的标定偏差有关。

为克服上述问题，Gantner 等^[1]利用 8 年紫外辐射、臭氧等观测资料，发展了一种经验方法来计算近 30 年紫外辐射的变化趋势。因此，尽可能多地利用可靠易得的气象、辐射观测资料，建立有一定物理基础的经验模式来计算紫外辐射及其长期变化趋势，也是一种有效的方法。

北京地区实际天气 1979 ~ 1996 年紫外辐射呈现减小趋势，主要是因为气溶胶因子的增长，虽然此期间大气臭氧呈减少趋势^[6]。由于不同地区大气臭氧、浑浊度、云量以及其他因素等的不同变化，才造成世界各地紫外辐射长期变化的差别。实际上，过量紫外辐射带来的危害多在晴天，因此，对晴天紫外辐射及其变化的研究更有实际意义。

2 观测及资料介绍

分光辐射的观测为 1990 年 1 月 ~ 1991 年 12 月，地点设在中国科学院大气物理研究所香河站。观测时间为日出至日落，辐射表头安放在楼顶。观测仪器分为：（1）3 个感应辐射表头，感应波段分别为 270 ~ 3 200 nm、400 ~ 3 200 nm、700 ~ 3 200 nm，通过计算便可得到紫外辐射（270 ~ 400 nm）的资料；（2）RYJ - 2 型日射记录仪及 PC - 1500 微机。仪器定期送国家计量部门标定，详细情况可参阅文献 [6]。1990 年 1 月 ~ 1991 年 12 月的观测资料，包括总辐射曝辐射量 Q 、紫外辐射曝辐射量 Q_{uv} 、大气臭氧总量 C_{O_3} （Dobson 臭氧仪观测）等。北京 1979 年 ~ 1998 年的总辐射曝辐射量、水平面直接辐射曝辐射量 S 、散射辐射曝辐射量 D 、地面水汽压 E 等取自北京观象台。

3 紫外辐射计算方法及计算结果

对 1990 年 12 个月晴天（云量 ≤ 2 ）辐射、臭氧等资料分析后，有计算紫外辐射的经验模式^[6]：

$$\eta = A_1 \cos Z + A_2 e^{-k_1 C_{O_3}^m} + A_3 e^{-D/S} + A_0, \tag{1}$$

式中， $\eta = Q_{uv}/Q$ ， A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_0 等均为常数。从物理上讲，影响 η 的因子有：（1）太阳运动规律，用天顶角 Z 的余弦表示。（2）臭氧对紫外辐射的选择吸收，用 $e^{-k_1 C_{O_3}^m}$ 表示，称为臭氧项，其中 k_1 为臭氧对紫外辐射的平均吸收系数， $k_1 = 3.30 \times 10^5 \text{ Pa cm}^{-1}$ ， C_{O_3} 为垂直气柱内臭氧含量（单位：Du）， m 为大气质量。（3）水汽对太阳总辐射的吸收，用 $e^{-k_2 w}$ 表示，称为水汽项， k_2 为水汽对太阳总辐射的平均吸收系数， w 为整层大气水汽含量，其值通过地面水汽压用经验公式得到。（4）空气分子、气溶胶、云等的散射，以及地表反照率对太阳总辐射、紫外辐射不同程度的影响，用 $e^{-D/S}$ 表示，称为气溶胶项。

采用逐步回归方法，处理了北京晴天 1990 年 12 个月晴天的紫外辐射及相关资料，得到 η 与 $\cos Z$ 在置信度 0.01 的水平高度相关，其 F 检验值为 1 103.5，臭氧项、水汽

项、气溶胶项的作用大致相同，并远较 $\cos Z$ 的作用程度小，它们的 F 值依次为 2.554、2.314、0.025。 η 与这 4 个因子的相关系数为 0.997。1990 年晴天紫外辐射的计算结果见表 1。

表 1 1990 年晴天紫外辐射月平均日总量 (MJ m^{-2}) 的观测值、计算值及相对偏差 δ (%)

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
观测值	0.95	1.27	1.37	1.48	1.54	1.65	1.52	1.48	1.44	1.36	0.98	0.82
计算值	0.96	1.25	1.35	1.52	1.57	1.63	1.54	1.46	1.43	1.37	0.99	0.82
δ	1.2	-1.3	-1.6	2.3	1.5	-1.2	1.4	-1.7	-1.3	1.0	0.4	-0.5

计算值与观测值吻合得比较好，12 个月相对偏差的平均值为 1.3%。为检验此方法的可靠性和实用性，利用 (1) 式计算了 1991 年晴天的紫外辐射，其结果见表 2。

表 2 1991 年晴天紫外辐射月平均日总量 (MJ m^{-2}) 的观测值、计算值及相对偏差 δ (%)

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
观测值	0.95	1.15	1.20	1.49	1.56	1.67	1.71	1.52	1.31	1.31	1.05	0.84
计算值	0.96	1.22	1.25	1.57	1.57	1.64	1.64	1.50	1.38	1.41	1.08	0.85
δ	0.9	6.0	3.5	5.3	0.5	-1.7	-4.4	-1.0	5.1	8.0	3.0	1.2

计算值与观测值仍然比较接近，12 个月相对偏差的平均值为 3.2%。为获得统计意义上更可靠的计算结果，对 1990 ~ 1991 年 24 个月晴天的数据做同样的逐步回归分析，得到类似 (1) 的公式，不同之处是系数的差别，并得到 η 与 $\cos Z$ 在置信度 0.01 的水平上高度相关， $F = 764.4$ ，臭氧项、水汽项、气溶胶项的作用大致相同，它们的 F 值依次为 0.05、5.24、2.10。 η 与这 4 个因子的相关系数为 0.990。 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 、 A_0 分别为 -6.52、-0.98、-4.14、-0.76、17.26。利用新系数计算了 1990 ~ 1991 年晴天的紫外辐射，其结果见表 3、表 4。

表 3 1990 年晴天紫外辐射月平均日总量 (MJ m^{-2}) 的观测值、计算值及相对偏差 δ (%)

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
观测值	0.95	1.27	1.37	1.48	1.54	1.65	1.52	1.48	1.44	1.36	0.98	0.82
计算值	0.94	1.22	1.31	1.49	1.55	1.65	1.55	1.46	1.40	1.35	0.97	0.82
δ	-0.4	-3.5	-4.5	0.3	0.8	-0.1	1.7	-1.9	-3.0	-1.1	-1.6	-0.6

表 4 1991 年晴天紫外辐射月平均日总量 (MJ m^{-2}) 的观测值、计算值及相对偏差 δ (%)

月 份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
观测值	0.95	1.15	1.20	1.49	1.56	1.67	1.71	1.52	1.31	1.31	1.05	0.84
计算值	0.95	1.18	1.22	1.55	1.58	1.65	1.66	1.50	1.36	1.39	1.06	0.84
δ	-0.2	3.0	1.2	4.2	1.0	-0.8	-3.3	-1.2	3.7	6.2	1.1	0.3

计算值与观测值吻合得比较好，24 个月的最大相对偏差和相对偏差的平均值为 6.2% 和 1.9%，因此，此计算方法是可行的。

4 1979 ~ 1998 年晴天紫外辐射的变化趋势

综合考虑总辐射 Q 、散射辐射 D 、直接辐射 S 、云量（小于 3）以及 D/S （小于 0.3）等条件，并考虑有臭氧观测的日期来选择晴天。个别月份，由于这样的天数很少，所以将 D/S 条件适当放宽到小于 0.6。利用公式（1）和新系数，计算了 1979 年 1 月 ~ 1998 年 12 月晴天紫外辐射月平均（日总量）值，图 1 给出计算结果。

评价紫外辐射变化趋势时，有必要看一下影响紫外辐射的各个因子以及总辐射（ Q ）、散射辐射（ D ）、直接辐射（ S ）的变化趋势，图 2、图 3、图 4 和图 5 分别给出近 20 年大气臭氧总量（ C_{O_3} ）、整层大气水汽含量（以地面水汽压 E 代替）、 D/S 因子和总辐射、散射辐射、直接辐射等月平均值的变化曲线。

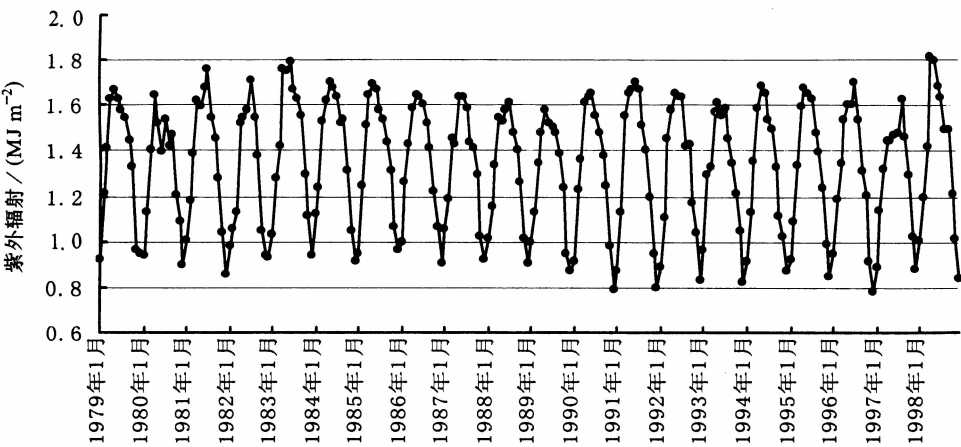


图 1 1979 ~ 1998 晴天紫外辐射的月平均值

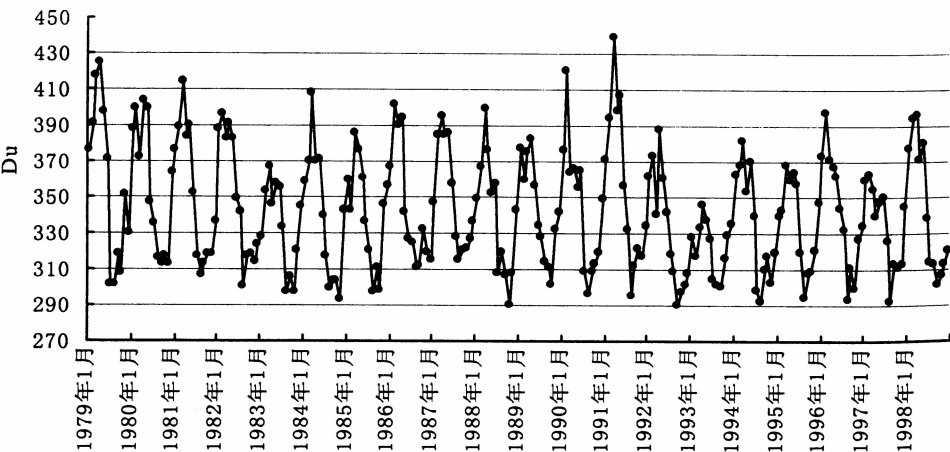


图 2 1979 ~ 1998 晴天大气臭氧的月平均值

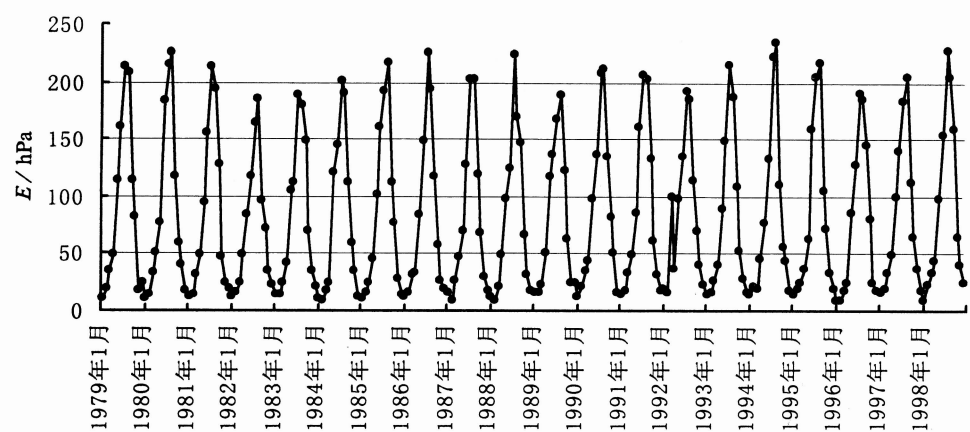


图 3 1979 ~1998 晴天整层大气水汽含量的月平均值

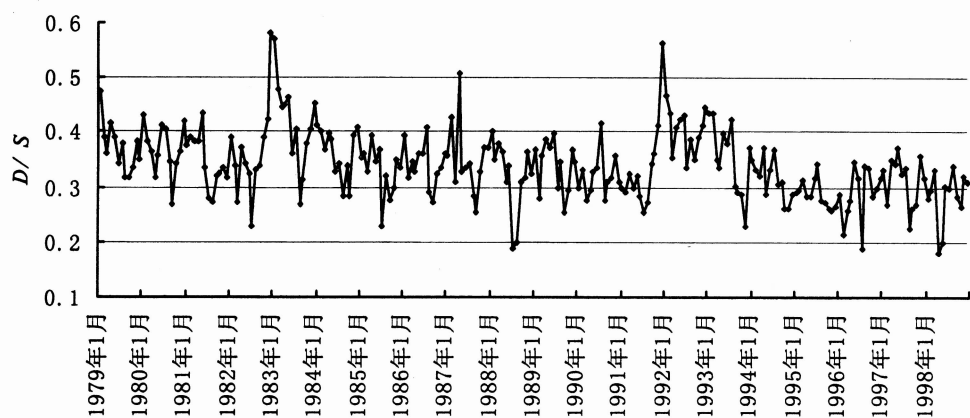


图 4 1979 ~1998 晴天 D/S 的月平均值

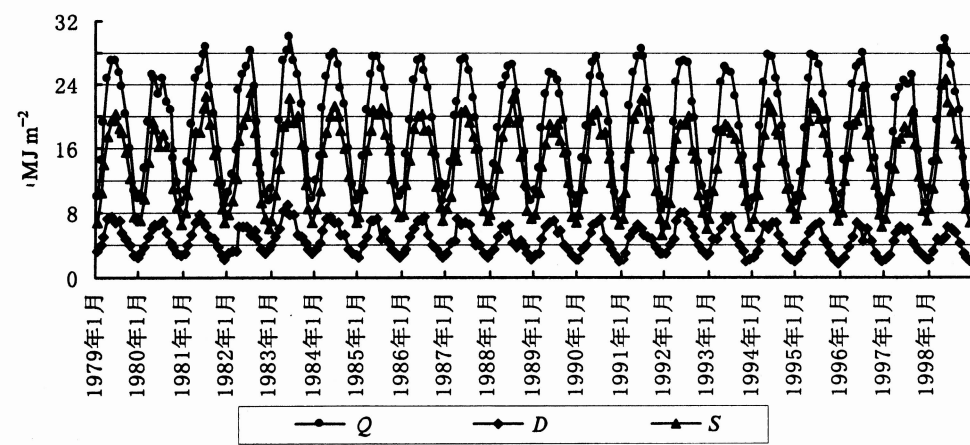


图 5 1979 ~1998 晴天总辐射 Q 、散射辐射 D 、直接辐射 S 的月平均值

近 20 年，北京晴天紫外辐射呈下降趋势，紫外辐射的减少率为 4.0%。影响紫外辐射的因子大气臭氧为下降趋势，减少率为 5.7%；整层大气水汽含量为上升趋势，增加率为 5.0%； D/S 因子为下降趋势，减少率为 21.1%。晴天，整层大气臭氧减少时，紫外辐射没有呈现上升趋势，而是呈下降趋势。根据以前对三个因子与紫外辐射定量关系的研究有：大气臭氧减少导致紫外辐射增加，水汽含量增加导致紫外辐射减小， D/S 减少导致紫外辐射增加。水汽含量增加所导致紫外辐射降低的原因，主要是因为大气中存在大量物质，它们本身以及它们在参加与 OH 自由基的光化学反应过程中对紫外辐射能量有不同程度的吸收。由于这些因子综合作用的结果，导致紫外辐射呈下降趋势。因此，在分析晴天和实际天气紫外辐射及其变化趋势时，不仅要考虑大气臭氧（公认的最重要因子），而且还要考虑气溶胶、水汽等因子（以前未被高度重视的因子）的综合作用。

从 1979 ~ 1998 年紫外辐射的逐月变化来看，它每年最大值的变化可分为两个阶段：1979 ~ 1991 年和 1991 ~ 1998 年，这两个阶段与太阳活动 11 年的周期基本吻合。太阳活动周期一般为 11.2 年，活动高峰期太阳黑子集中爆发，约持续两三年，上次黑子集中爆发在 1989 ~ 1991 年，这与我们看到的紫外辐射在 1979 ~ 1991 年期间的变化规律是相吻合的。近 20 年两次比较大的火山爆发——1982、1992 年的 El Chichon 和 Pinatubo 火山都造成当年紫外辐射最大月平均值比上一年降低，同时 D/S 月平均最大值比上一年增加。

近 20 年晴天状况下，总辐射月平均值也呈下降趋势，减少率为 3.5%。直接辐射为上升趋势，其增加率为 2.5%，散射辐射为下降趋势，其减少率为 19.1%。

夏季紫外辐射是一年中最强的，又与臭氧光化学污染、人体健康等密切相关。因此，研究夏季的紫外辐射非常重要，近 20 年紫外辐射以及各量在不同季节年平均值的计算结果见表 5。

表 5 近 20 年晴天各量在不同季节的变化率（%）

	Q_{UV}	C_{O_3}	E	D/S	Q	D	S
春	-2.0	-7.6	3.1	-25.1	-1.1	-22.9	7.5
夏	-0.7	-4.0	-3.5	-14.7	0	-12.5	4.4
秋	-3.5	-2.4	4.4	-9.4	-3.3	-11.1	-0.9
冬	-8.0	-3.3	17.7	-26.7	-7.6	-28.2	1.5

Q_{UV} 、 C_{O_3} 、 E 、 D/S 、 Q 、 D 、 S 等各量的变化趋势在春、秋、冬季基本上都类似， S 在秋季有点例外，但值比较小。这 3 个季节， C_{O_3} 和 D/S 的减小使 Q_{UV} 增加，而 E 的增加使 Q_{UV} 减小，它们共同的作用造成 Q_{UV} 的减小趋势。夏季， C_{O_3} 、 E 、 D/S 等均呈下降趋势， Q_{UV} 呈现减小趋势，减小率为 0.7%，可认为基本上没有多少变化。另一方面，由于 C_{O_3} 、 E 、 D/S 等因子均呈下降趋势，它们共同的作用将造成 Q_{UV} 的增加，实际上，看到 Q_{UV} 是 0.7% 的减小率。同期总辐射 Q 基本上没有变化， D/S 的减小表明大气气溶胶粒子成分的减少， E 的减小也有助于大气透明度的改善。综合分析各量的变化， Q 和 Q_{UV} 都应是增加趋势，而实际并非如此。其原因可能是：1) 大气上界太阳辐射呈减小趋势，紫外辐射组分也随之减小；2) 近地面大气中各种

污染物浓度的增加, 造成它们对太阳辐射、特别是紫外辐射的衰减增强。近年来, 北半球对流层大气中的污染物如 NO_x 、 O_3 等有增加的趋势^[8], 同时, 大气中还存在大量的挥发性有机物 (VOC)。这些气体中的大量成分对紫外辐射有直接吸收, 另外, 很多成分虽然不直接吸收紫外辐射, 但它们通过与 OH 、 H_2O_2 自由基、臭氧等的化学和光化学反应, 对紫外辐射有间接吸收, 如异戊二烯、单萜烯等。臭氧在紫外辐射波段光解产生 $\text{O} (^1\text{D})$ 原子, $\text{O} (^1\text{D})$ 再与 H_2O 反应, 生成 OH 自由基, 因此对流层 OH 自由基的产生依赖于对紫外辐射的利用。而 OH 自由基几乎参与大气中绝大部分的化学反应, 它起着催化剂、能量传输和再利用的作用。由于近地层物质密度远大于对流层上部及平流层, 近地层气溶胶粒子又较平流层多, 因此使得光程比较大, 造成它们对紫外辐射的衰减比我们以前认为的明显增大。对流层各类污染物的增加, 使得它们对紫外辐射直接和间接吸收在近 20 年变得可能更加明显和重要了。另外, 虽然紫外辐射在总辐射中占的比例很小, 但各种污染物对紫外辐射的衰减作用远比对总辐射的衰减强得多, 因此可以看到近 20 年各季 Q_{UV} 的减小率总比 Q 的减小率略大一些。

近年对紫外辐射及其长期变化的研究, 从只注重大气臭氧, 已转移到考虑气溶胶、云等对紫外辐射的作用, 但这还不够。以前的研究表明, 1979 ~ 1996 年北京实际天气紫外辐射下降的原因主要是由于 D/S 的增加, 但根据对晴天紫外辐射的分析, 只考虑臭氧、水汽、气溶胶等的作用还不全面, 还应考虑近地面污染物如 NO_x 、 O_3 、VOC 等对紫外辐射的衰减, 包括直接和间接吸收。大气中的 VOC 数以千计, 它们对紫外辐射能量直接和间接的吸收是不应低估的。因此, 应加强系统监测以及它们对紫外辐射衰减定量描述的研究。可能由于这一原因, 造成近 20 年北京晴天紫外辐射呈现不升反降的趋势, 由于这些气体成分不像大气颗粒物那样对 D/S 因子有非常明显的影响。

从 D 、 S 随光学厚度变化的基本规律来看, S 随光学厚度的增加而单调减小, 而 D 随光学厚度的变化则复杂得多, 一般情况下是随光学厚度的增加而增加 (第 I 段), 当达到某一值后便逐渐减小 (第 II 段), 呈类似抛物线的变化。1979 ~ 1998 年北京的 S 呈上升趋势, D 呈下降趋势, 表明北京近 20 年晴天的大气状况处于 D 的第 I 段, 即大气质量比较好, 光学厚度较小, 气溶胶粒子以小粒子成分为主, 近 20 年的 S 增加 2.5%、 D 减小 19.1%、 D/S 下降, 说明北京晴天的大气正在变得比较洁净, 而且小粒子成分正在减少。但近 20 年北京机动车辆的逐步增多、市区和郊区树木、草地的增加, 造成大量污染气体及 VOC 等排放的增加, 它们比气溶胶粒子对 D 、 S 、 D/S 的影响程度弱一些, 而细节方面 D/S 可能反映不出这些气体成分的变化。目前模式都没有直接考虑它们对紫外辐射的衰减, 本文也只是间接考虑它们对紫外辐射的吸收, 因此, 今后有必要做深入的研究, 并加强对它们理化性质的实验室研究, 及时将新结果提供给模式, 以促进对大气中复杂物理化学过程认识的逐步深入。

另外, 若只考虑臭氧因子对紫外辐射的衰减, 则其衰减可表示为 $A_2 e^{-k_1 C_{\text{O}_3}^m}$, A_2 为系数。将整层大气臭氧分为平流层臭氧 ($C_{\text{O}_3, \text{S}}$) 和对流层臭氧 ($C_{\text{O}_3, \text{T}}$), 由 $C_{\text{O}_3, \text{S}}$ 和 $C_{\text{O}_3, \text{T}}$ 的变化造成地面紫外辐射的变化可分别表示为: $A_2 k_1 m e^{-k_1 C_{\text{O}_3, \text{S}}^m} \Delta C_{\text{O}_3, \text{S}}$, $A_2 k_1 m' e^{-k_1 C_{\text{O}_3, \text{T}}^m} \Delta C_{\text{O}_3, \text{T}}$ 。一般, 由于 $C_{\text{O}_3, \text{S}}$ 远大于 $C_{\text{O}_3, \text{T}}$, $\Delta C_{\text{O}_3, \text{S}}$ 远小于 $\Delta C_{\text{O}_3, \text{T}}$, 在同一

天顶角时, $m' > m$, 因此有 $A_2 k_1 m e^{-k_1 C_{O_3,s}^m} \Delta C_{O_3,s} < A_2 k_1 m' e^{-k_1 C_{O_3,T}^m} \Delta C_{O_3,T}$, 即 $C_{O_3,T}$ 变化(如日变化、日际变化)要比 $C_{O_3,s}$ 变化对地面紫外辐射带来更明显的影响。所以, 加强研究 $C_{O_3,T}$ 以及其他污染成分的变化造成地面紫外辐射的变化尤为重要。2000 年后的 3 年内, 是第 23 太阳周的高峰期, 加强此期间紫外辐射及其影响因子的监测和预报方法的研究, 加强对紫外辐射长期变化(特别是晴天)的研究, 无疑将具有重要的理论意义和实用价值。

参 考 文 献

1 Gantner, L., P. Winkler, and U. Köhler, A method to derive long-term time series and trends of UV-B radiation (1968~1997) from observations at Hohenpeissenberg (Bavaria), *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(D4), 4879~4888.

2 Schwander, H., P. Koepke, and A. Ruggaber, Uncertainties in modeled UV irradiances due to limited accuracy and availability of input data, *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(D8), 9419~9429.

3 Berger, D., The sunburning ultraviolet meter; Design and performance, *Photochem. Photobiol.*, 1976, **24**, 587~593.

4 Scott, J., G. Cotton, F. Urbach et al., Biologically effective ultraviolet radiation; Measurements in the United States, 1974 to 1985, *Science*, 1988, **239**, 762~764.

5 Blumthaler, M., and W. Ambach, Indication of increasing solar ultraviolet-B radiation flux in alpine regions, *Science*, 1990, **248**, 206~208.

6 白建辉、王庚辰, 1979~1996 年期间北京地区太阳紫外总辐射的变化趋势, *大气科学*, 1998, **22**(5), 709~717.

The Variation Trends of Ultraviolet Radiation in Clear Sky during the Last Two Decades in Beijing

Bai Jianhui^{1,2)}, Wang Gengchen²⁾ and Hu Fei¹⁾

- 1) (State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029)
- 2) (Laboratory for Middle Atmosphere Layer and Globe Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100029)

Abstract On the basis of analyzing observational data about solar radiation, meteorological parameter and total ozone amount during the period of 1979~1998 in Beijing area, an empirical calculating method for UV radiation in clear sky is obtained, the results show that the calculated values agree well with those observed. The maximum relative bias is 6.2%, and the mean relative bias for 24 months is 1.9%. The long-term UV radiation from 1979 to 1998 is calculated by using this method, and UV variation trends are given by different ways. It is found that the UV radiation in clear sky shows a decreasing trend in the last 20 years. The long-term variation trends and relations of UV with its main factors affecting UV including ozone, water vapor, and D/S are discussed thoroughly.

Key words: ultraviolet radiation; ozone; water vapor; aerosol; pollutant