

# 广州大气气溶胶对到达地表紫外辐射的衰减

邓雪娇<sup>①</sup>, 周秀骥<sup>②</sup>, 铁学熙<sup>③</sup>, 吴兑<sup>①</sup>, 李菲<sup>①</sup>, 谭浩波<sup>①</sup>, 邓涛<sup>①</sup>

① 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080;

② 中国气象科学研究院, 北京 100081;

③ National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA

E-mail: dxj@grmc.gov.cn

2011-07-14 收稿, 2012-01-16 接受

国家自然科学基金(41175117, 40875090, 40375002)、国家重点基础研究发展计划(2011CB403403)、广东省科技计划(2010A030200012)和广东省气象局科技创新团队计划(201103)资助

**摘要** 利用地表紫外辐射(UV, 295~385 nm)观测、太阳光度计与辐射模式定量评估了广州大气气溶胶对UV的衰减。观测表明UV谱区340 nm的气溶胶光学厚度(AOD)年平均值达1.19, 气溶胶光学厚度  $AOD_{340\text{ nm}} > 1.0$  的年均出现频率达55%, 对地表340 nm紫外直接辐射的年均衰减率达68%。地表紫外辐射观测与模式评估表明全年大气对UV的平均衰减达75%, 干季(10, 11, 12, 1月)的平均衰减达72%; 大气气溶胶在干季对UV的平均衰减达62%。表明目前广州城市群大气气溶胶对紫外辐射的衰减十分显著, 至少一半以上的紫外辐射被大气气溶胶衰减, 如此大幅度的衰减对城市生态系统、物种化学循环尤其是光化学反应过程将有重大的影响。

## 关键词

气溶胶光学厚度  
衰减率  
紫外辐射  
大气气溶胶

云与气溶胶是影响到达地表太阳辐射的最主要因子<sup>[1,2]</sup>, 在地球气候环境系统中扮演重要的角色, 当前, 城市化导致的高浓度人为气溶胶对地气辐射系统的扰动十分显著<sup>[3,4]</sup>, 也影响到达地面的紫外辐射量, 这对城市生态系统、物种化学循环尤其是光化学反应过程都有重大的影响<sup>[5,6]</sup>。紫外辐射是大气光化学反应的能量驱动源, 对OH自由基与臭氧的形成起到关键的作用, 如波长305~320 nm的光使得O<sub>3</sub>发生光解, 光解产生的自由基是OH自由基的重要来源; 波长310~396 nm的光使得HNO<sub>2</sub>发生光解, 光解直接产生OH自由基; 波长190~350 nm的光使得H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>发生光解, 光解直接产生OH自由基; 波长301~356 nm的光使得CH<sub>2</sub>O发生光解, 光解产生的H自由基是HO<sub>2</sub>自由基的重要来源; 波长202~422 nm的光使得NO<sub>2</sub>发生光解, 是O<sub>3</sub>形成的重要环节。因此, 影响紫外辐射的因子将同样影响OH自由基与O<sub>3</sub>的形成产率, 从而影响大气物质循环系统, 尤其是在大城市群

地区, 高浓度的气溶胶对紫外辐射与城市物质循环生态系统的影响应引起足够的重视。

近几年国际上城市群的污染研究得到明显加强, 世界气象组织(WMO, 2001)<sup>[7]</sup>为此建立了城市气象和环境研究计划(GURME)及研究应对措施。2004年起中美科学家联合开展了东亚对流层气溶胶研究观测计划<sup>[8]</sup>, 定量分析了中国部分地区气溶胶的特征及其对地表太阳短波辐射与紫外辐射的影响, 发现在中国北部地区气溶胶对太阳辐射有显著的衰减作用<sup>[9,10]</sup>。以往城市气溶胶污染问题主要关注散射性(如硫酸盐)气溶胶较多, 近年的研究开始关注吸收性(如黑碳)气溶胶、有机碳气溶胶以及气溶胶的间接效应对太阳辐射、大气光解作用和O<sub>3</sub>形成的影响作用<sup>[11-13]</sup>。早在1977年Dave<sup>[14]</sup>测量UV辐射来估算大气气柱中的臭氧总量时考虑了气溶胶的影响, 1980年Anita<sup>[15]</sup>研究了大气混浊度和霾对纽约紫外辐射的影响, 1998年Richard和Gordon<sup>[16]</sup>研究了在不同云条

件下对 UVB 的估算, Lyamani 等人<sup>[17]</sup>研究了 2003 年西班牙东南部气溶胶的微物理垂直属性及辐射强迫, Tie 等人<sup>[18,19]</sup>利用全球模式(MOZART)研究了全球云与气溶胶对 UV 与臭氧的影响,发现云与气溶胶对 UV 辐射的影响很大,并且具有很大的空间与时间变化特征。

近年,我国也逐渐关注空气污染对紫外辐射的影响研究,如北京城区受大气污染的影响,地面处的紫外辐射量最大减弱幅度可达 50%<sup>[20]</sup>;上海地区当能见距离小于 2500 m 时,各月的紫外线辐射强度减弱的百分比都接近一半左右<sup>[21]</sup>。但总体上以往在北京、上海、广州的紫外辐射观测研究<sup>[22-24]</sup>,主要针对紫外辐射量本身大小的观测分析,我国城市群区域的大气气溶胶对紫外辐射的衰减问题仍缺乏定量分析。大气气溶胶是目前广州地区大气污染的首要污染物,观测事实表明气溶胶通过衰减紫外辐射影响臭氧的生产力有明显的表征体现<sup>[25]</sup>,并初步得到模式的验证<sup>[6,26]</sup>。本文利用近年地表紫外辐射观测资料、太阳光度计观测的气溶胶光学厚度资料与 NCAR TUV 辐射模式探讨研究目前广州严重的气溶胶污染对紫外辐射的影响问题,尤其是对广州城市群严重污染经常出现的干季(秋、冬季节,10,11,12,1月)大气气溶胶对地表紫外辐射的衰减份额进行细致的分析。

## 1 资料与 NCAR TUV 辐射模式模拟与观测的对比

本文统计分析了 2000, 2004 和 2006 年的紫外辐射资料序列。资料用 Eppley TUVR 型辐射计观测得到,国内外的许多科研单位使用美国 Eppley 实验室的 TUVR 型紫外辐射表进行紫外辐射观测研究<sup>[27,28]</sup>,其测量范围为 295~385 nm,测量总紫外辐射,数据采集器采集每分钟 5 次测量的平均值。目前,我国尚无用于太阳紫外辐照度测量的标准,国外进口紫外辐射表使用到规定期限后(一般为 1 年),只能返回原产国重新标定,或使用公认通用的标准辐射表进行统一对比观测标定。本文所用的 3 年紫外辐射观测资料分别由 Eppley TUVR 型编号为 32132, 33543, 34192 的新辐射表从开始观测起为期 1 年的资料,只选用新表 1 年的资料以保证观测资料的质量, TUVR 型紫外辐射表的详细性能介绍及其误差来源分析参见谭浩波等人<sup>[29]</sup>的文章。气溶胶光学厚度资料由美

国 Solar Light 公司的 Microtops II 太阳光度计观测得到,共有 5 个波段,分别为 340, 500, 870, 936 和 1020 nm,半波宽度为 10 nm,视场角为 2.5°。太阳光度计的观测要求太阳表面无云遮挡,因此观测的时间不连续,分析的结果代表无云天气条件下的 AOD 情况, AOD 观测的最大不确定性来源于观测误差,而观测误差主要来自太阳的瞄准精确度<sup>[30]</sup>和云的甄别,采用固定支架和通过增加测量次数可以有效地减少这种误差,每次观测连续测 5 组读数,取平均值,参考 Smirnov 等人<sup>[31]</sup>提出的云检测方案,若 5 组读数出现波动且偏差超过 0.03,则认为存在瞄准偏差或者有云遮挡太阳。利用太阳光度计进行气溶胶光学厚度的反演计算以及 Langley 定标可分别参见毕雪岩等人<sup>[32]</sup>、谭浩波等人<sup>[33]</sup>的文章,本文所用太阳光度计 Langley 法标定结果与出厂标定值相差不大,出厂标定值略大于标定结果,可能的原因是由于滤光片或光电传感器的老化,使得光电传感器接收到的辐射量或转换的电压减少,但总体误差小于 2%,说明仪器的稳定性较好,观测结果可信。本文分析位于紫外谱区 340 nm 的气溶胶光学厚度 3 年(2004, 2005, 2006 年)统计的月变化特征及其计算的直接辐射透过率。紫外辐射与太阳光度计观测地点位于广东省气象局 20 层楼顶(113°18'E, 23°08'N),海拔高度约为 98 m,离地面高度 70 m,观测点位于广州市越秀区,属于城市中心区。

本文采用的辐射传输模式是 NCAR TUV(Tropospheric Ultraviolet and Visible Radiation Model),由美国国家大气研究中心(NCAR, National Center of Atmospheric Research)的 Madronich 和 Flocke<sup>[34]</sup>共同研究开发的计算对流层紫外辐射与部分可见光辐射的模式,模式波长取值范围 121~735 nm。模式采用 2 流或  $n$  流方案求解辐射传输方程。Mayer 等人<sup>[35]</sup>使用 TUV 模式计算了全球直接辐射和散射辐射、光化通量, Castro 等人<sup>[36]</sup>用 TUV 模式计算的 NO<sub>2</sub> 光化率系数  $J[\text{NO}_2]$  和仪器观测的  $J[\text{NO}_2]$ ,发现如果考虑边界层的气溶胶分布,则两者吻合较好。邓雪娇<sup>[37]</sup>在 2008 年完成的研究工作中通过大量的紫外辐射观测与 TUV 模式模拟的对比分析发现在广州地区利用辐射模式,只有输入合理的气溶胶辐射特性参数(光学厚度,单散射因子 SSA 等)才能准确计算得到地表的紫外辐射,如 2006 年 12 月 17~27 日清洁与污染过程以实测的气溶胶光学厚度等参数输入, TUV 模式计

算得到了与紫外辐射观测很一致的结果。

本文运用 TUV 辐射模式求解紫外辐射通量, 计算中以模式设定的标准大气廓线作为输入, 臭氧总量来自卫星观测(图 1), 积分谱区与 Eppley TUVR 型辐射计的监测波长 295~385 nm 一致. 紫外辐射经过大气层到达地表的过程中受到云、气溶胶与空气分子的散射与吸收衰减, 其中空气分子主要是大气臭

氧、污染气体( $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ )对紫外辐射具有吸收作用, 特别是平流层臭氧层的存在吸收了大量的紫外辐射, 小于 290 nm 的紫外辐射基本不能到达地表. 有研究表明到达地表的紫外辐射主要是受云与气溶胶(而不是臭氧)的影响<sup>[38,39]</sup>, 在无云情况下气溶胶比臭氧对地表紫外辐射(>315 nm)的衰减作用更大<sup>[40,41]</sup>. 图 2 为不同浓度级别的 AOD,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ 对到达地表紫

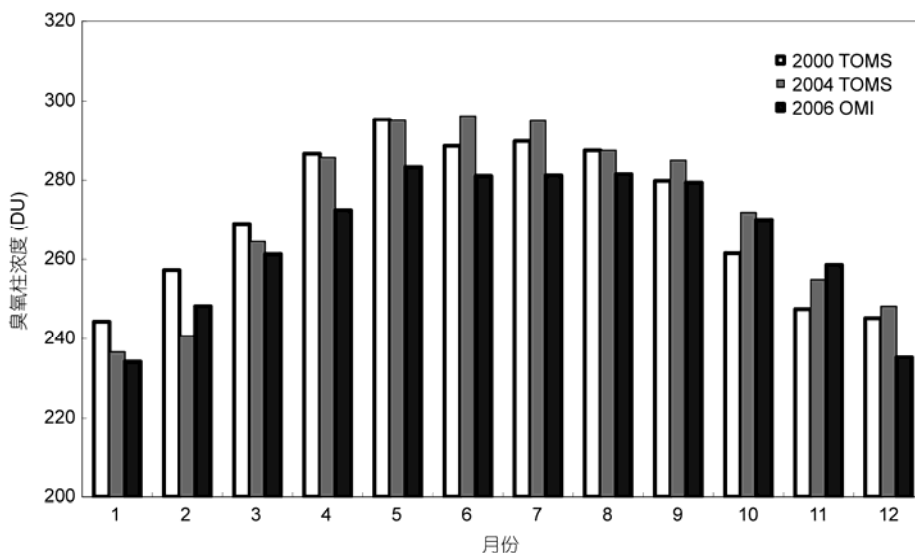


图 1 卫星观测的广州臭氧总量的月变化  
2000 与 2004 年资料来自 TOMS; 2006 年资料来自 OMI

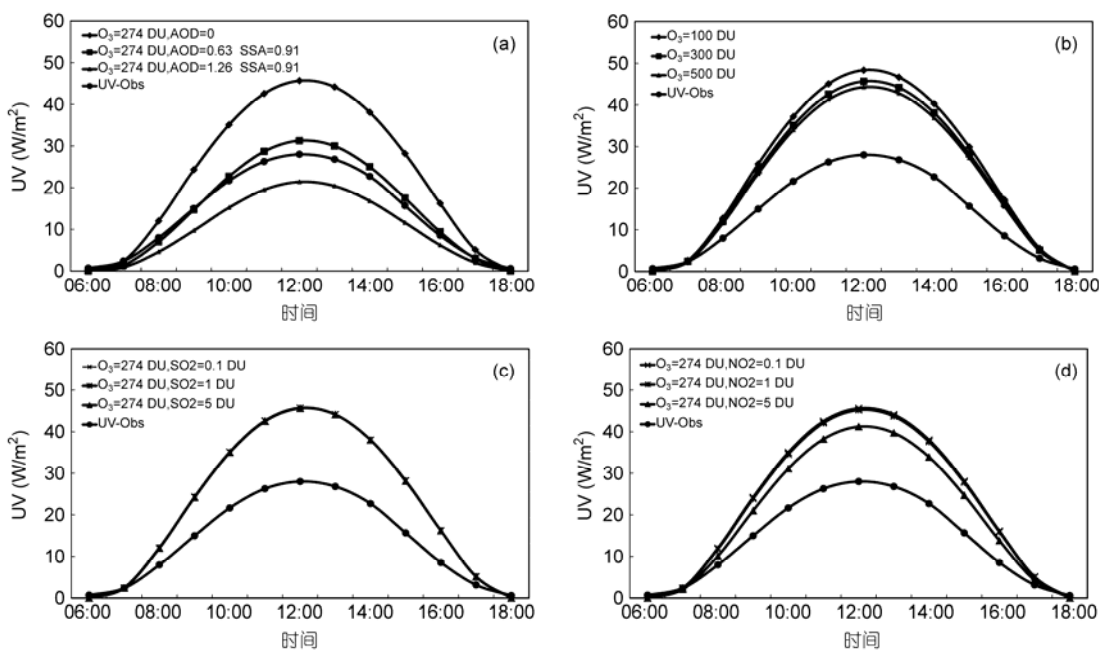


图 2 不同浓度级别的气溶胶光学厚度 AOD(a),  $\text{O}_3$ (b),  $\text{SO}_2$ (c),  $\text{NO}_2$ (d)对到达地表紫外总辐射的衰减对比  
2006 年 11 月 7 日臭氧柱含量为 274 DU

外总辐射的衰减对比,可见,地表观测的紫外辐射主要由气溶胶的衰减引起的,如不考虑气溶胶的衰减则不可能准确计算得到地表紫外辐射.计算表明 O<sub>3</sub> 总量为 300 DU 与 500 DU 引起的地表紫外衰减的差别很小,不同 SO<sub>2</sub> 总量计算的结果重叠为一条线,表明 SO<sub>2</sub> 对地表紫外辐射的衰减可忽略,图 1 表明广州的臭氧在 234~296 DU 之间,相对于目前广州高浓度气溶胶污染造成的 UV 辐射衰减,臭氧以及其他污染物引起的 UV 衰减为小量.相对于臭氧与高浓度的气溶胶,本文没有考虑污染气体(SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>)对紫外辐射的作用,误差是存在的,通过 TUV 模式对不同浓度级别的 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> 对紫外辐射的衰减对比分析,这一误差小于 5%.

## 2 紫外谱区气溶胶的光学厚度与直接辐射衰减率

地面观测的紫外辐射分为直接辐射与散射辐射两部分,大气气溶胶对直接辐射的衰减只取决于气溶胶光学厚度(AOD).AOD 的大小表明了大气柱中的气溶胶含量,是大气浑浊度的一个基本物理量.图 3 是广州中午观测的 340 nm 气溶胶光学厚度的月变化,可见,全年各月 AOD 平均值在 0.67~1.74、最小值在 0.28~0.97、最大值在 1.44~2.87 之间变化;3 月的 AOD 全年最高,平均值为 1.74,最高可达 2.67;次最高值为 10 月,平均值为 1.31,最高可达 2.80;5 月的 AOD 全年最低值,平均值为 0.67,最高仅达 1.44,目前广州 340 nm 的气溶胶光学厚度 AOD >1 的年均出现频率为 55%,年均值为 1.19(有关广州气溶胶光学厚度的观测特征参见文献[33]).春季(3,4 月)出现较大 AOD 值可能与这季节较大的相对湿度导致气溶胶粒子的

亲水增长有关,春季是东南亚生物质燃烧的季节,较大的 AOD 也可能与东南亚污染物的长距离输送有关<sup>[42]</sup>;而秋季出现较大的 AOD 可能与这季节较弱的平流与湍流扩散气象条件出现污染的累积有关.一般地,认为 AOD 的低(高)值与清洁(污染)天气相联系,由图 3 可见,全年之中,只有 5 与 6 月的最大值与最小值之差距比较小,其他月均比较大,说明广州一年之中大多数月份均会出现比较清洁与比较污染的过程,10 月的 AOD 出现极大值,同时 10 月的最大值与最小值之差距也出现极大值,说明 10 月污染过程十分明显;3,4 月也有类似的情况,但与 10 月处于不同的季节,10 月属于“干季”是明显的“干气溶胶”污染月,而 3 和 4 月是“湿季”是属于“湿气溶胶”污染月,3 和 4 月较高的 AOD 与气溶胶的吸湿增长效应可能存在密切相关.

据 Ångström 函数关系  $\frac{AOD_1}{AOD_2} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^\alpha$ , 在广州观

测得到的波长指数  $\alpha$  约为 1.4<sup>[37]</sup>,可见气溶胶光学厚度与波长具有非线性特性,波长越大,相应的光学厚度越小,呈  $\alpha$  指数衰减.实际上小于 290 nm 的辐射不能到达地面,图 4 是太阳光度计直接观测的 340 nm 以及由 Ångström 函数关系得到的几个紫外波段的直接辐射衰减率,可见衰减率与气溶胶光学厚度呈一致的变化特征,气溶胶越多,AOD 值越大,对直接辐射的衰减越强,如 3 和 4 月份 AOD 值较大,直接辐射衰减率也较大.全年平均地,实际观测的 340 nm 直接辐射衰减率高达 68%;推算的 300, 350, 400, 450 nm 的平均光学厚度为 1.42, 1.15, 0.95 和 0.81,相应的紫外直接辐射的衰减率高达 74%, 67%, 60% 和 54%.说明在广州目前的污染状况下,气溶胶对紫外辐射

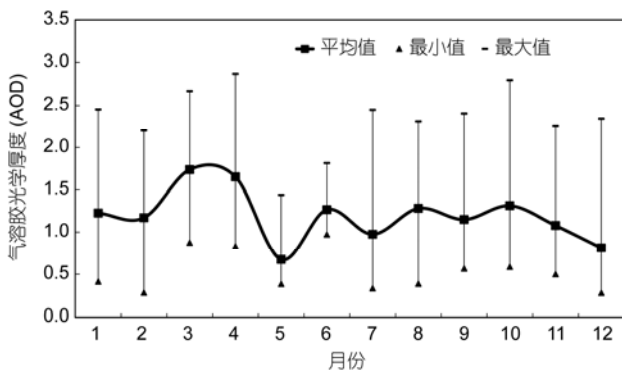


图 3 广州观测的 340 nm 气溶胶光学厚度的月变化

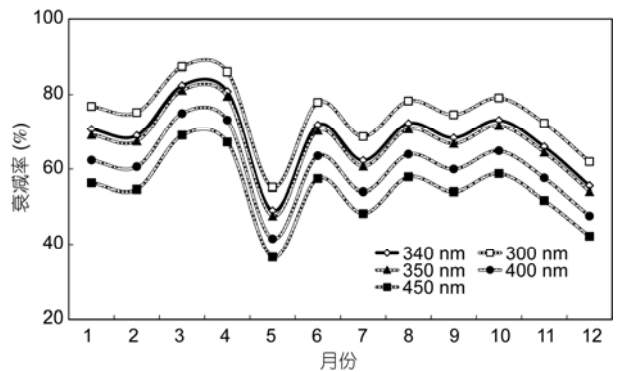


图 4 广州气溶胶的紫外直接辐射衰减率(1-exp(-AOD))

衰减十分显著,至少一半以上的紫外直接辐射被气溶胶衰减.

### 3 实际大气对地表紫外总辐射的衰减率

图5是2000,2004,2006年观测的紫外辐射(295~385 nm)的平均月变化情况.可见,一年之中紫外辐射最强是夏季,其次是秋、冬季.一年之中月平均出现最大辐射的是7月份,(295~385 nm)波段06:00~18:00,10:00~14:00,12:00平均是10.0,16.0,17.3 W/m<sup>2</sup>;3月份出现最小辐射量,(295~385 nm)波段06:00~18:00,10:00~14:00,12:00的月平均是4.0,

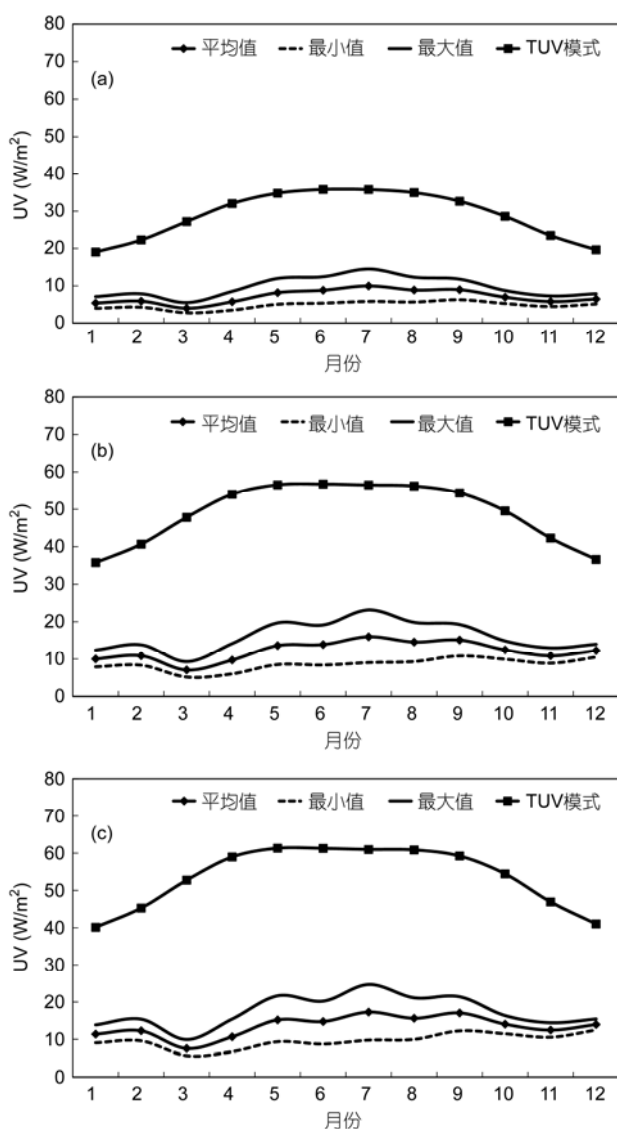


图5 实际观测的紫外总辐射(295~385 nm)的月变化  
(a) 06:00~18:00; (b) 10:00~14:00; (c) 12:00

7.1, 7.6 W/m<sup>2</sup>. 从图5可见06:00~18:00,10:00~14:00,12:00平均的紫外辐射变化形态很相似,尤其是10:00~14:00,12:00平均的紫外辐射只在数值上略有些差异,10:00~14:00平均的紫外辐射与12:00紫外辐射的比值在0.87~0.94之间变化,说明虽然紫外辐射在午间最强,但午间前后10:00~14:00的辐射也只在辐射最大值的13%之间变化.图5中TUV模式是在无云无气溶胶情况下计算的相应波谱紫外辐射,对比可见,理论模式计算的地表可得到的最强紫外辐射与实际地表得到的紫外辐射差异很大,说明实际大气(云与气溶胶)对紫外辐射的衰减是十分明显的.

地面辐射表观测得到的辐射是太阳辐射经过整层大气的消光(散射、吸收)作用到达地面的辐射,即辐射表观测得到的是直接辐射与散射辐射的加和(向下的辐照度强度).实际观测情景中天空可能同时存在云与气溶胶等对辐射衰减的因子,观测得到的辐射是经过大气各种因子(空气分子、云与气溶胶等)的衰减,大气对紫外辐射的衰减率(UV<sub>AR</sub>, ultraviolet radiation attenuation ratio)可表示为

$$UV_{AR} = (UV_{tuv} - UV_{obs}) / UV_{tuv} \times 100\%, \quad (1)$$

式中,UV<sub>tuv</sub>为无云无气溶胶情况下辐射模式计算的地表可得到的最大辐射量,UV<sub>obs</sub>为地表实际观测到的紫外辐射量,大气对紫外辐射的衰减率UV<sub>AR</sub>的大小表征实际大气对地表紫外总辐射衰减的程度.

图6是实际大气对紫外辐射衰减率UV<sub>AR</sub>的月变化.可见,全年不同时间段(06:00~18:00,10:00~14:00,12:00)平均的衰减率十分接近,只在10,11月有相对明显的不同;全年之中衰减率在86%~66%之间变化,3月份的衰减率最大值为86%,4月份次最大值为82%,12月份的衰减率最小为66%,其他各月

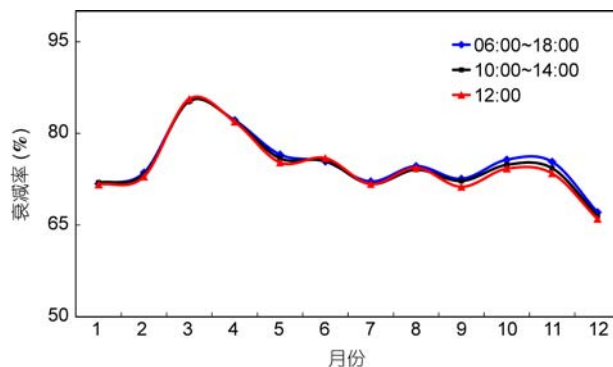


图6 实际大气对地表紫外辐射衰减率UV<sub>AR</sub>的月变化

(1, 2, 5~11月)在71%~75%之间变化, 干季(10, 11, 12, 1月)的衰减率平均为72%。全年平均75%的紫外辐射不能到达地面, 特别是10, 11月的衰减率是下半年的极大值。可见, 目前广州的实际大气对紫外辐射的衰减是很明显的, 这些衰减主要是由云与气溶胶的散射与吸收引起的。

#### 4 大气气溶胶对地表紫外总辐射的衰减率

大气气溶胶通过吸收与散射作用衰减太阳辐射, 该过程依赖于气溶胶的粒径大小与化学组成。要说明大气气溶胶对紫外辐射的衰减必须应用晴天的观测资料(以排除云的影响)、本文分析高时间分辨率采样(每分钟5次测量的平均值作为1个样本)的Eppley TUVR型原始脉动资料、文献[43]的方法来区分云天与晴天, 分析表明在春末至夏季的5~8月没有出现过全天晴天的天气, 在广州的天气气候条件下, 在秋、冬季节较多出现无云的天气, 这里着重讨论资料代表性较好、且是广州污染比较严重的10, 11, 12, 1月干季的情况。

图7是晴天观测的295~385 nm紫外辐射的月变化。可见干季(10, 11, 12, 1月)在气溶胶与空气分子的影响下, 观测的295~385 nm的辐射在06:00~18:00, 10:00~14:00, 12:00的平均值分别为(9.5, 7.8, 8.0, 7.3), (17.2, 14.6, 15.4, 14.0), (19.3, 17.3, 18.2, 15.4) W/m<sup>2</sup>, 各月变化幅度很小, 最小值、最大值与平均值十分接近, 说明晴天情况下, 紫外辐射的脉动变化很小。与图5一致, 图7中TUV模式是在无云无气溶胶情况下计算的相应波谱紫外辐射, 对比可见, 理论模式计算的地表可得到的最强紫外辐射与晴天地表得到的紫外辐射差异很大, 这一差异说明的是大气气溶胶对紫外辐射的衰减十分显著。

图8是晴天大气气溶胶对紫外辐射衰减率UV<sub>AR</sub>的月变化。可见, 干季(10, 11, 12, 1月)在午间12:00平均地气溶胶对295~385 nm辐射的衰减率分别是65%, 64%, 57%, 60%, 气溶胶对295~385 nm紫外辐射平均有62%的衰减程度; 其他月如9, 2, 3, 4月的衰减率在54%~61%之间, 平均有58%的衰减。而干季10, 11, 12, 1月在06:00~18:00平均地气溶胶对295~385 nm辐射的衰减率分别是67%, 67%, 59%, 62%, 平均有64%的衰减; 其他月如9, 2, 3, 4月的衰减率在55%~63%之间, 平均有61%的衰减。对比分析表明正午12:00与白天06:00~18:00平均的大气气溶胶

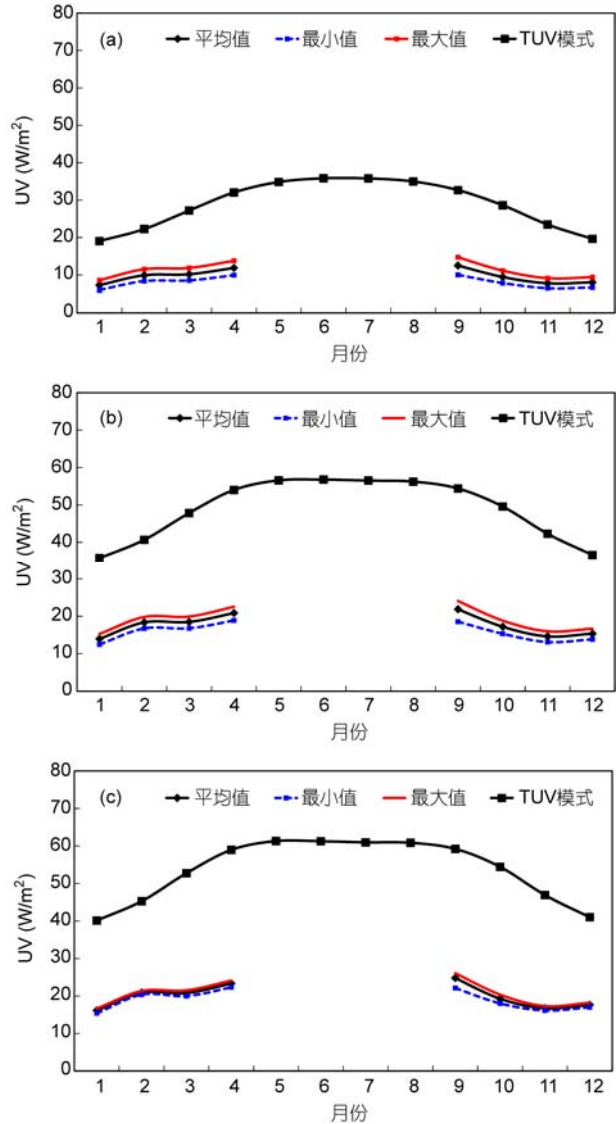


图7 晴天观测的紫外总辐射的月变化  
(a) 06:00~18:00; (b) 10:00~14:00; (c) 12:00

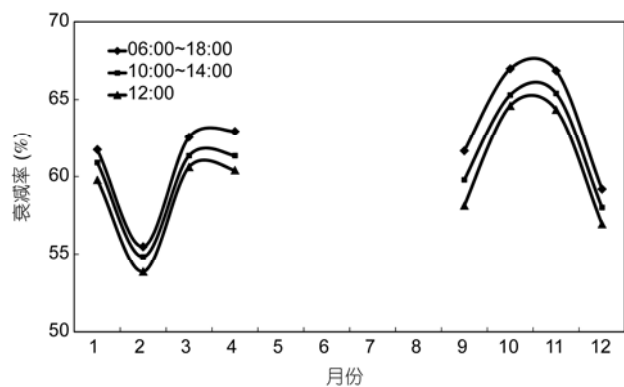


图8 晴天大气气溶胶对地表紫外辐射衰减率UV<sub>AR</sub>的月变化



对紫外辐射的衰减率很接近,说明太阳高度角的变化导致的辐射光程越长使得气溶胶的衰减率略有增大,但增幅仅3%范围内。对比图6实际大气对紫外辐射衰减率的月变化,可见,干季(10, 11, 12, 1月)两者衰减率的差别较小,说明在干季紫外辐射的衰减主要是由气溶胶引起的。

## 5 结论

(1) 广州全年紫外谱区340 nm的AOD平均值为1.19, 340 nm的气溶胶光学厚度AOD>1的年均出现频率为55%。分析表明目前广州城市群大气气溶胶

对340 nm直接辐射的衰减高达68%。

(2) 广州的实际大气对紫外辐射的衰减很明显。全年对295~385 nm紫外辐射的平均衰减达75%;干季(10, 11, 12, 1月)的大气衰减平均达72%;这些衰减主要是由云与气溶胶的散射与吸收引起的。

(3) 干季(10, 11, 12, 1月),在午间12:00,白天06:00~18:00气溶胶对295~385 nm紫外辐射平均有62%, 64%的衰减。分析表明正午与白天气溶胶对紫外辐射的衰减率很接近,太阳高度角变化导致的辐射光程增长使得气溶胶的衰减率增幅约在3%范围内变化。

## 参考文献

- Coakley J A, Cess R D, Yurevich F B. The effect of tropospheric aerosols on the earth's radiation budget: A parameterization for climate models. *J Atmos Sci*, 1983, 40: 116-138
- 夏节鳌. 全球陆地上空MODIS气溶胶光学厚度显著偏高. *科学通报*, 2006, 51: 2297-2303
- 毛节泰, 张军华, 王美华. 中国大气气溶胶研究综述. *气象学报*, 2002, 60: 625-634
- Li Z. Influence of absorbing aerosols on the inference of solar surface radiation budget and cloud absorption. *J Clim*, 1998, 11: 5-17
- 周秀骥. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响. 北京: 气象出版社, 1996
- 邓雪娇, 周秀骥, 吴兑, 等. 珠江三角洲大气气溶胶对地面臭氧变化的影响. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41: 93-102
- WMO. The Global Atmosphere Watch(GAW) Strategic Plan 2001-2007, 2001
- Li Z, Chen H, Cribb M, et al. Overview of the East Asian study of tropospheric aerosols: An international regional experiment (EAST-AIRE). *J Geophys Res*, 2007: D22S00, doi: 10.1029/2007JD008853
- Xia X, Chen H, Li Z, et al. Significant reduction of surface solar irradiance induced by aerosols in a suburban region in northeastern China. *J Geophys Res*, 2007, 112: D22S02, doi: 10.1029/2006JD007562
- Liu J, Xia X, Wang P, et al. Significant aerosol direct radiative effects during a pollution episode in northern China. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L23808
- Li G H, Zhang R Y, Fan J W, et al. Impact of black carbon aerosol on photolysis and ozone. *J Geophys Res*, 2005, 110: D23206, doi: 10.1029/2005JD005898
- Ralph E M, Bonyoung K, Alex G, et al. Model sensitivity evaluation for organic carbon using two multi-pollutant air quality models that simulate regional haze in the southeastern United States. *Atmos Environ*, 2006, 40: 4960-4972
- Wu D, Mao J T, Deng X J, et al. Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 52, doi: 10.1007/s11430-009-0115-y
- Dave J V. Effect of aerosols on the estimation of total ozone in an atmospheric column from the measurements of its ultraviolet radiance. *J Atmos Sci*, 1978, 35: 899-911
- Anita B B. The effects of sunshine, cloudiness and haze on received ultraviolet radiation in New York. *J Appl Meteorol*, 1980, 19: 889-893
- Richard H G, Gordon M H. Estimation of ultraviolet-B irradiance under variable cloud conditions. *J Atmos Sci*, 2000, 39: 904-916
- Lyamani H, Olmo F J, Ntara A A, et al. Atmospheric aerosols during the 2003 heat wave in southeastern Spain II: Microphysical columnar properties and radiative forcing. *Atmos Environ*, 2006, 40: 6465-6476
- Tie X, Madronich S, Walters S, et al. Effect of Clouds on photolysis and oxidants in the troposphere. *J Geophys Res*, 2003, 108: 4642, doi: 10.1029/2003JD003659
- Tie X, Madronich S, Walters S, et al. Assessment of the global impact of aerosols on tropospheric oxidants. *J Geophys Res*, 2005, 110: D03204, doi: 10.1029/2004JD005359
- 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京地面紫外辐射与空气污染的关系研究. *环境科学*, 2008, 29: 1054-1058
- 张维, 邵德民. 影响上海地区太阳紫外辐射的研究. *气象*, 2002, 28: 48-54
- 白建辉, 王庚辰, 胡非. 近20年北京晴天紫外辐射的变化趋势. *大气科学*, 2003, 27: 273-280

- 23 祝青林, 于贵瑞, 蔡福, 等. 中国紫外辐射的空间分布特征. 资源科学, 2005, 27: 108–113
- 24 王晶, 侯红英. 青岛地区太阳紫外线辐射研究. 中国海洋大学学报, 2006, 36: 671–676
- 25 邓雪娇, 吴兑, 铁学熙, 等. 大城市气溶胶对光化辐射通量及臭氧的影响研究( I )—国内外研究现状与观测事实述评. 广东气象, 2006, 3: 10–17
- 26 邓雪娇, 铁学熙, 吴兑, 等. 大城市气溶胶对光化辐射通量及臭氧的影响研究( II )—数值试验分析. 广东气象, 2006, 4: 5–11
- 27 吴兑, 邓雪娇. 环境气象学与特种气象预报. 北京: 气象出版社, 2001
- 28 汤洁, 王炳忠. 国产紫外总日射表性能测试(II): 室外测试及国外同类产品比较. 太阳能学报, 2005, 26: 313–320
- 29 谭浩波, 邓雪娇, 吴兑, 等. TUVR 型紫外辐射表性能研究. 应用气象学报, 2008, 19: 367–371
- 30 Kirk D K, Christophe P, Giulietta S F. Sun Pointing Error Correction for sea deployment of the MICROTUPS II handheld sunphotometer. J Atmos Oceanic Tech, 2003, 20: 767–771
- 31 Smirnov A, Holben B N, Eck T F, et al. Cloud screening and quality control algorithms for the AERONET database. Rem Sens Environ, 2000, 73: 337–349
- 32 毕雪岩, 吴兑, 谭浩波, 等. Microtops II 型太阳光度计的使用、计算及定标. 气象科技, 2007, 35: 583–588
- 33 谭浩波, 吴兑, 邓雪娇, 等. 广州气溶胶光学厚度的观测研究. 环境科学学报, 2009, 29: 1146–1155
- 34 Madronich S, Flocke S. The role of solar radiation in atmospheric chemistry. In: Handbook of Environmental Chemistry. Heidelberg: Springer-Verlag, 1999. 1–26
- 35 Mayer B, Fischer C B, Madronich S. Estimation of surface actinic flux from satellite(TOMS) ozone and cloud reflectivity measurements. Geophys Res Lett, 1998, 25: 4321–4324
- 36 Castro T, Madronich S, Rivale S, et al. The influence of aerosols on photochemical smog in Mexico city. Atmos Environ, 2001, 35: 1765–1772
- 37 邓雪娇. 广州气溶胶的特征及其对能见度与地面臭氧变化的影响. 博士学位论文. 北京: 北京大学, 2008
- 38 Krzycin J W, Puchalski S. Aerosol impact on the surface UV radiation from the ground-based measurements taken at Belsk, Poland, 1980–1996. J Geophys Res, 1998, 13: 16175–16181
- 39 Papayannis A, Balis D, Bais A, et al. Role of urban and suburban aerosols on solar UV radiation over Athens, Greece. Atmos Environ, 1998, 32: 2193–2201
- 40 Koronakis P S, Sfantos G K, Paliatsos A G, et al. Interrelations of Vglobal/global/diffuse solar irradiance components and UV-global attenuation on air pollution episode days in Athens, Greece. Atmos Environ, 2002, 19: 3173–3181
- 41 Kalashnikova O V, Mills F P, Eldering A, et al. Application of satellite and ground-based data to investigate the UV radiative effects of Australian aerosols. Rem Sens Environ, 2007, 107: 65–80
- 42 Deng X J, Tie X, Zhou X J, et al. Effects of Southeast Asia biomass burning on aerosols and ozone concentrations over the Pearl River Delta (PRD) Region. Atmos Environ, 2008, 42: 8493–8501
- 43 Long C N, Ackerman T P. Identification of clear skies from broadband pyranometer measurements and calculation of downwelling shortwave cloud effects. J Geophys Res, 2000, 105: 15609–15626