

# 长春地区紫外光谱 (UV-A, UV-B) 辐射观测和初步分析\*

吕达仁 李 卫

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

李福田 唐玉国 马海涛

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

**摘 要** 利用我们研制的太阳—大气紫外光谱辐射计, 从 1992 年 5 月在长春开始试验了野外观测, 监视到达地表的太阳直射和大气散射紫外光谱辐射, 主要给出长春地区地面紫外辐射, 特别是紫外 (UV) B 段 (280~320 nm) 光谱辐射的一些基本特点和初步统计特征。由于地表 UV-B 辐射对生态系统和人类健康有危害作用, 其强度随着臭氧减少而增加。该项观测分析将有助于监测和研究臭氧层变薄的实际效应。

**关键词** 紫外辐射 UV-B 辐射 紫外光谱辐射计

## 1 引言

南极春季臭氧洞的持续出现和北半球中纬度近十年来臭氧总量持续减少的事实使科学家和公众进一步关注其对生态系统和人类健康的可能损害。其主要关注点之一就是由于臭氧减少, 到达地表的紫外 (UV) B 段辐射是否实际增加。因为已有的研究表明, UV-B (280~320 nm) 辐射确实对各类生物和人体有重大损害作用<sup>[1,2]</sup>, 臭氧层是吸收太阳辐射 UV-B 谱的关键气体, 此外, 空气分子、气溶胶和云对 UV-B 也有重要的散射和吸收作用<sup>[3~6]</sup>。到达地表的 UV-B 辐射是综合作用的结果, 需要在全球范围内实际监测, 并进行相应的模式研究才有可能全面了解臭氧减少与到达地表的 UV-B 辐射之间的关系。由于以上原因, 在全球各地的 UV-B 辐射测量正在积极展开<sup>[7~12]</sup>。

国际上已经开展的 UV-B 测量有两类。一类是采用滤光片式的 UV-B 表, 即测量具有滤光片加权的 UV-B 波段总辐射量<sup>[13,14]</sup>。这类测量比较简单易行, 因而在较多的地点已开展了较长期的监测。UV-B 表的缺点是滤光片加权作用使人们较难从测值中分析对各类生物和人体的损伤严重性, 因为各种效应对 UV-B 谱段内的各波长具有极不相同的响应。另一类是 UV-B 光谱辐射测量, 即利用具有绝对定标 (标准灯) 能力的光谱辐射计进行测量, 获得光谱辐射绝对值。这类仪器比较复杂, 目前在全球范围内实际监测的点还很少, 时段也较短, 但它的好处是显而易见的。有了这样的测量, 就可能用以系统分析 UV-B 谱辐射变化的各种生态效应的严重性。因此, 国际学术界在呼

1994-12-17 收到, 1995-07-13 收到修改稿

\* 本项目工作得到国家自然科学基金委重点基金支持; 仪器研制得到 863 计划航天领域支持

吁加强全球 UV-B 长期监测的同时, 特别强调开展 UV-B 光谱辐射的长期测量<sup>[1]</sup>。

UV-B 光谱辐射的长期监测需要高质量的紫外光谱辐射计, 具有经常的定标。各国目前采用着不同的仪器。已有的观测与初步分析已经提供了 UV-B 谱变化及其与臭氧变化等因素关系的许多知识。当前各国已不断增加紫外光谱辐射点, 并加强观测仪器的相互对比, 例如西欧开展了观测仪器的对比<sup>[13]</sup>。

我国紫外光谱辐射测量工作一直未能开展。在 863 计划航天领域对地观测方面的支持下, 我们开展了空间太阳—大气紫外光谱辐射监测器的预研制工作, 并以地基光谱辐射计为第一步。本文将简单介绍我们研制的地基太阳—大气紫外光谱辐射计, 随后介绍用该仪器在长春进行的初步观测结果, 并讨论长春 UV-B 变化的某些特点, 最后提出一些进一步研究的想法。

## 2 仪器和观测

我们观测所用的地基紫外光谱辐射计是为研制空间观测用的太阳—大气紫外光谱辐射计的第一步。太阳—大气紫外光谱辐射计 (SAUVS) 的基本结构如图 1 所示, 由标准光源、单色仪、探测器、放大器、计算机控制和数据采集系统构成。光谱仪

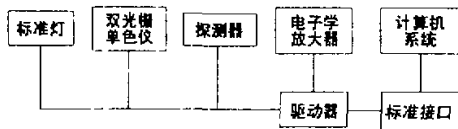


图 1 太阳—大气紫外光谱辐射计 (SAUVS) 框图

覆盖波段 120~400 nm。标准光源采用  $\text{MgF}_2$  窗口氙灯 (115~300 nm) 和石英卤钨灯 (260~400 nm)。单色仪为无中间狭缝双光栅单色仪, 其结构示于图 2。工作波段 120~400 nm, 光谱分

辨率 0.05 nm, 波长精度 0.05 nm, 光学系统焦距 500 mm, 两平面光栅刻线密度为 1200 线/mm, 表面镀  $\text{MgF}_2$  膜, 150 nm 处光栅绝对效率 46%。在计算机系统控制下由步进电机驱动精密丝杠, 同步旋转两块光栅实现波长扫描。为适应真空紫外波段工作, 单色仪内充  $1.1 \times 10^5$  Pa 氙气。单色仪结构如图 2 所示。探测器分别采用 EMR541G 日盲型光电倍增管 (120~200 nm) 和 R928 光电倍增管 (>200 nm)。探测器输出经高稳定度线性电流放大器放大后, 送入 12 位 A/D 转换器, 由 IBM 兼容微机采集、处理。

本仪器适用于空间、高空气球和地面观测。在地基观测时由于观测不到真空紫外波段辐射, 故只用 R928 光电倍增管, 单色仪内亦不充氙气。在野外观测时采用积分球为前置光系统, 如图 3 所示。积分球内径 100 mm, 入射通光口径 30 mm, 出射光通口径

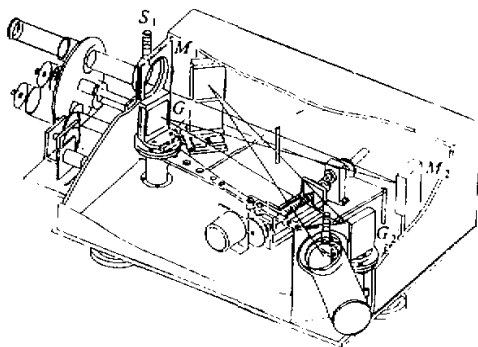


图 2 双光栅单色仪结构示意图

$S_1$ : 入缝,  $M_1$ : 准直光镜,  $M_2$ : 聚光镜,  $G_1$ 、 $G_2$ : 平面光栅

11 mm, 两者夹角  $90^\circ$ 。观测时可测量总半球辐射 (太阳直射加大气散射), 也可以用一直径为 40 mm 遮光球以  $\pm 0.5^\circ$  遮挡角挡住太阳, 实现大气散射辐射单独测量。当相邻两种测量时大气状态无变化时, 测量差值即为太阳直射紫外谱辐射。这样的测量方式将十分有利于不但监测总紫外辐射, 而且可利用其资料研究分析各种控制因子各自的贡献。

由于仪器的性能关键在其绝对精度和相对精度, 我们对其辐射定标下了很大的功夫, 有关详情可参阅作者的另一篇论文<sup>[16]</sup>, 经过绝对定标的地基光谱辐射计在 290~400 nm 范围内绝对值不确定性为 5%~10%, 相对精度为  $\pm 1\%$ ~2%。280~290 nm 由于辐射弱, 有杂散光的影响, 结果不很可靠。国际上某些应用的光谱辐射计在该段的工作情况亦不够好。指标已经达到国际上正在使用的同类仪器水平 (见表 1)。

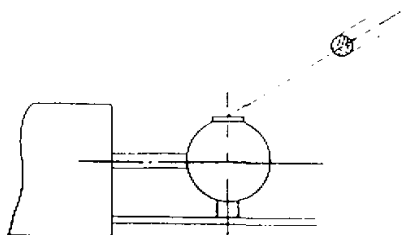


图3 地基SAUVS-G仪器前置光学系统示意图

表1 主要仪器性能指标对比

| 仪 器                       | Bentham<br>DM150 | JY<br>DH10 | Brewer<br>MKIII  | Optronics<br>742 | JY<br>HR320      | SAUVS       |
|---------------------------|------------------|------------|------------------|------------------|------------------|-------------|
| 焦距/mm                     | 150              | 100        | 160              | 100              | 320              | 500         |
| 光栅刻线密度/线 $\text{mm}^{-1}$ | 2400             | 1200       | 1800             | 1200             | 1200             | 1200        |
| 带宽/nm                     | 0.8              | 1.4        | 0.6              | 1.4              | 0.37             | 0.6         |
| 扫描步长/nm { 常用<br>最好        | 0.5<br>0.04      | 0.5<br>0.2 | 0.5<br>0.1       | 1.0<br>0.1       | 0.1<br>0.01      | 0.1<br>0.01 |
| 常用扫描范围/nm                 | 280~500          | 280~500    | 290~339          | 280~500          | 290~600          | 280~450     |
| 扫描时间/s                    | 120              | 220        | 345              | 275              | 390              | 420         |
| 散射器                       | 聚四氟乙烯            | 积分球        | 聚四氟乙烯            | 聚四氟乙烯            | 石英               | 积分球         |
| 探测器                       | PM EMI Bi        | PM R292    | PM EMI<br>9789QA | PM S-20          | PM EMI<br>9789QA | PM R928     |

自 1992 年 5 月起, 在长春开始了试观测。观测地点在长春光机所楼顶 ( $43^\circ 50' \text{N}$ ,  $125^\circ 00' \text{E}$ )。观测方式采用轮流观测总半球通量 (太阳直射加大气散射, 记为 AS) 和单独大气散射通量 (记为 A) 两种模式。为扩展测量动态范围, 在测量波段上也采用分段 (290~315, 300~340, 300~450 nm) 交替方式, 以保证 UV-B 段观测有较高的灵敏度。1992 年底以前试验观测比较零散, 主要用于检验仪器的稳定性和测量精度。观测和初步分析表明仪器是可靠稳定的。1993 年 3 月开始作较为系统的测量。

### 3 初步分析结果

图 4 为我们所观测的典型晴天光谱辐射图。如前所述, AS 和 A 分别代表总半球辐射和大气散射辐射。这是相邻两次观测, 大气质量 ( $m$ ) 十分接近, 其比值谱 (见图 8) 代表各波长上直接辐射与散射辐射所占的比例, 对此下面还要作详细的分析。本文所用资料是 1992 年 5 月观测和 7~12 月的较少观测, 1993 年 3~5 月较系统的观测。

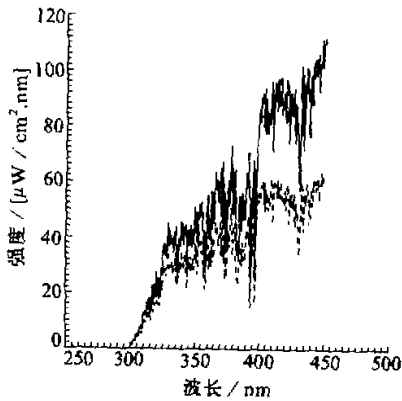


图4 典型晴天 (1993年4月19日, 12:04,  $m = 1.193$ ) 的紫外光谱观测值  
实线为半球总辐射, 虚线为散射辐射

### 3.1 UV-B和UV-A总量的变化特点

(1) 我们分别将观测光谱分为 UV-B (290~315 nm) 和 UV-A (315~400 nm) 各自的积分辐射值, 分别记为  $E_b$  和  $E_a$ , 并计算观测时刻的大气质量, 分析其辐射值与大气质量  $m$  的关系。结果发现  $E_b - m$  和  $E_a - m$  的关系都可以较好地用幂指数关系拟合。图5为直到1993年5月所有观测晴天和少云天的点聚图和拟合曲线, 分别绘上 AS 和 A 两种模态的分布。

(2) 为了解月际变化, 我们将1993年3、4、5三个月的观测分别作拟合, 图6表示拟合的结果。结果表明, 月际之间在绝对强度上有一定差别, 但变化趋势十分相似。

(3) 1992年和1993年正处于1991年

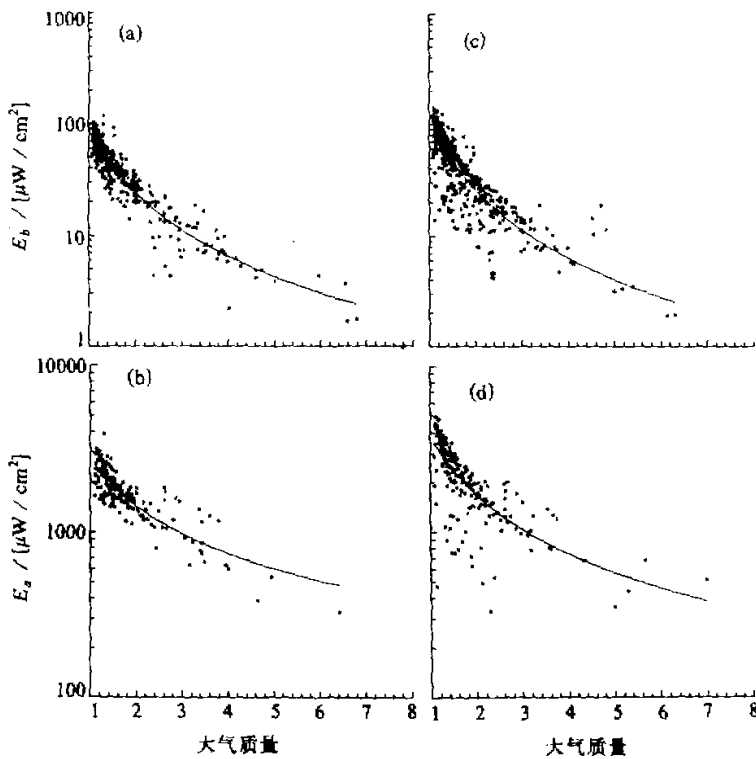


图5 1992年5月~1993年5月的  $E_a$ 、 $E_b$  与  $m$  统计关系图

(a) UVB 散射辐射; (b) UVA 散射辐射; (c) UVB 半球总辐射; (d) UVA 半球总辐射

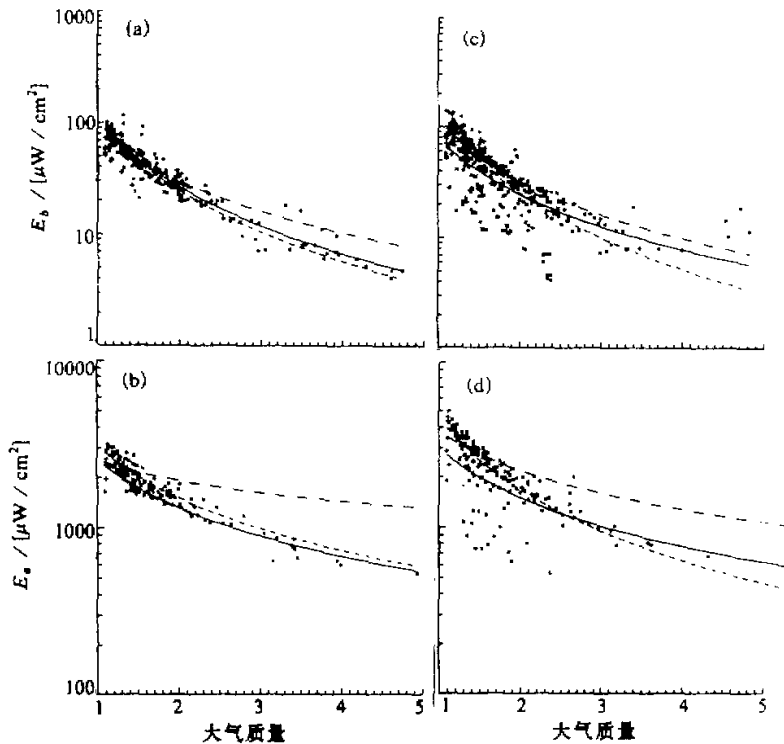


图 6 1993 年 3、4、5 三个月  $E_a$ 、 $E_b$  与  $m$  的统计关系图

图中拟合线: 实线为 3 月值, 短虚线为 4 月值, 长虚线为 5 月值

(a) UVB 散射辐射; (b) UVA 散射辐射; (c) UVB 半球总辐射; (d) UVA 半球总辐射

Pinatobu 火山强喷发后平流层火山云的影响和逐渐消散期。火山云的存在应对 UV 辐射的平均情况有影响, 可以预计 1993 年相同季节的地面 UV-B 辐射应强于 1992 年同期情况。图 7 为 1992 年 5 月和 1993 年 5 月的比较, 可以看出两者存在着系统差别。同一期间, 在北京利用曙暮光偏振光度计和平流层气溶胶激光雷达所做的长期监测<sup>1)</sup>亦明显地表示出火山气溶胶的衰减变化。这一差别可以用以估计两年同期火山云光学厚度的平均差别。

上述有关 UV-B 和 UV-A 总量的统计和拟合曲线大致反映了长春 UV-B 和 UV-A 辐射的一般情况, 可利用作为估计实际地面紫外辐射强度的依据, 至少对我国东北地区有一定代表性。

### 3.2 UV-B 和 UV-A 的光谱特点

UV-B 和 UV-A 光谱的特点实际上是由地外太阳光谱、大气吸收气体 ( $O_3$ 、 $SO_2$ 、 $NO_2$  等)、空气分子、气溶胶和云所决定。地面所作 UV 谱的监测, 其目的方面在于获得光谱辐射长期变化的实际数据, 另一方面在于分析上述各控制因子各自的贡

1) 吴北婴、孙金辉, 私人通信

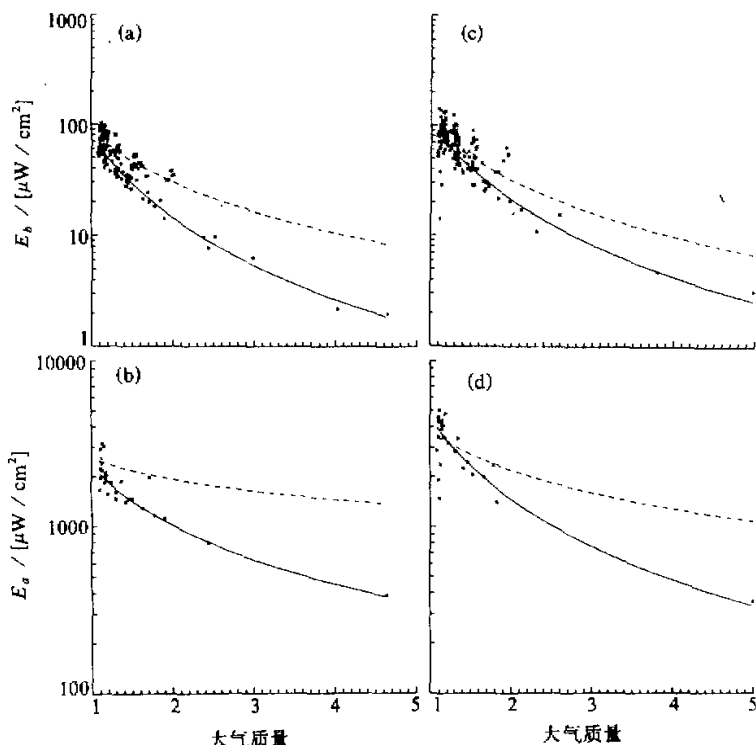


图 7 1992 年 5 月和 1993 年 5 月  $E_a$ 、 $E_b$  与  $m$  的统计关系图

图中拟合线: 实线为 1992 年 5 月值, 虚线为 1993 年 5 月值

(a) UVB 散射辐射; (b) UVA 散射辐射; (c) UVB 半球总辐射; (d) UVA 半球总辐射

献及综合作用, 建立起光谱辐射值与各控制因子的定量关系模式。为推广其结果于不同的时间与地点, 获得区域和全球性的图象。本文作为初步分析, 将给出晴天光谱辐射的日变化特征、散射与总辐射比值光谱特征。至于定量模型将在另文加以研究。

### 3.2.1 晴天散射与总辐射比值光谱

图 8 给出 1993 年 3~4 月间 3 个典型晴天的 3 条散射与总辐射比值光谱曲线, 记为  $R_s(\lambda)$ 。这是相邻两次 A 和 AS 观测值的比值,  $m$  值彼此非常接近, 可以代表同时的散射光谱比例,  $1 - R_s(\lambda) = R_d(\lambda)$  也就是太阳直射光谱比值。从图中可以看出各曲线之间彼此十分相似而又数值上不同的特征。这些特征归结为: ①随波长减短  $R_s(\lambda)$  有单调上升趋势; ②在 450 至 320~330 nm 波长范围内,  $R_s(\lambda)$  具有线性变化趋势, 各天斜率不同; ③在 330~310 nm 段线性变化仍成立, 但斜率绝对值变小; ④在 310~300 nm 段, 由于杂散光比例过大, 结果不可靠。

上述这些特点是普遍的, 我们可以对此作出定性分析。在 450~330 nm 段, 分子散射和气溶胶散射 (和弱吸收) 在散射贡献上起支配作用, 并无明显的吸收。空气分子总量变化很小, 因此可以作出分子散射基本贡献的定量估计, 并肯定其随波长减小而增

加的单调趋势。构成大气散射贡献的基本曲线 (记为  $R_0(\lambda)$ )。因此这一段  $R_S(\lambda)$  的变化主要在于大气气溶胶在各日的变化。在一般大气气溶胶情况, 其散射截面亦近似具有  $\lambda^{-\beta} (\beta \geq 0)$  的变化趋势, 因此也可以推断由气溶胶参与贡献的  $R_S(\lambda)$  亦将随  $\lambda$  变小单调增加, 这一过程造成的  $R_S(\lambda)$  与  $\lambda$  的近线性关系是由于多次散射过程形成的, 在较短的波长范围 (310~330 nm) 出现的  $R_S(\lambda)$  更平缓变化也大致可以以此解释。这种单调和更平缓的变化应该是多次散射更强的结果。上述定量结果表明, 紫外段特别是 UV-B 段散射辐射所占比例极高, 可高达 80%。这一点对于考虑 UV 辐射与生态系统相互作用的定量模式以及人体对紫外的防护思路会有一定启发。

### 3.2.2 晴天不同时间光谱辐射比值光谱

当比较稳定的晴天, 如果其控制因素被认为较为稳定时, 则不同时刻光谱之间的比值就取决于这些因子的气柱含量和不同观测时刻所处的大气质量。对这个比值谱 (记为  $R_r(\lambda)$ ) 的分析也为定量分析各控制因子的作用并以此建立起紫外辐射光谱的日变化模型提供基础。

图 9 给出 1993 年 4 月 19 日的几条日变化比值光谱曲线, 包括了 AS 和 A 两个模态情况。以该日中午最强的光谱曲线为基底, 其他时刻同模态观测曲线与之相比得  $R_r(\lambda)$ 。

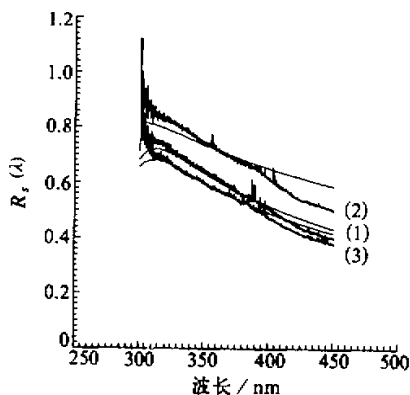


图 8 300~450 nm 晴天散射辐射与半球总辐射比值  $R_S$   
图中细线为模式计算值, 粗线为观测值, 图中各曲线的观测时间分别为:

- (1) 1993 年 3 月 18 日 13:03,  $m = 1.49$ ;
- (2) 1993 年 4 月 3 日 11:28,  $m = 1.28$ ;
- (3) 1993 年 4 月 16 日 13:05,  $m = 1.28$

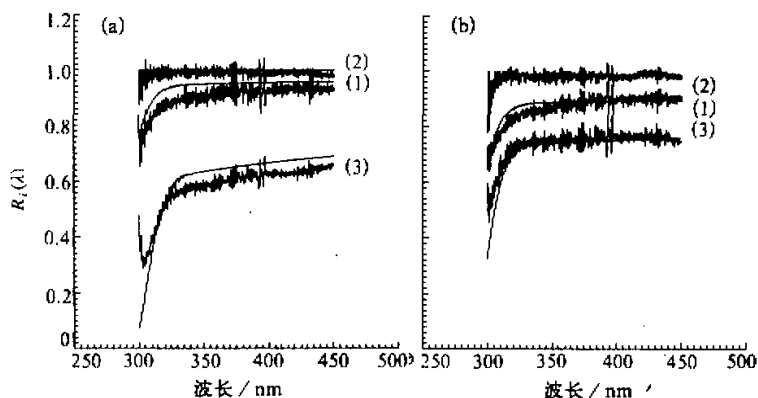


图 9 1993 年 4 月 19 日不同时间辐射光谱比值  $R_r$

图中细线为模式计算值, 粗线为观测值; 图中各比值线的观测时间分别为

- (a) (1)  $\frac{10:10}{12:08}, m: \frac{1.26}{1.20}$ ; (2)  $\frac{11:09}{12:08}, m: \frac{1.20}{1.20}$ ; (3)  $\frac{15:19}{12:08}, m: \frac{1.86}{1.20}$
- (b) (1)  $\frac{10:01}{11:59}, m: \frac{1.28}{1.20}$ ; (2)  $\frac{11:01}{11:59}, m: \frac{1.20}{1.20}$ ; (3)  $\frac{14:06}{11:59}, m: \frac{1.43}{1.20}$

由图 9 可以看出, (1) 无论 AS 或 A 模态, 在所测的  $m$  值范围内, 450 到 330~320 nm 波段上其比值变化极为缓慢, 一般可视为常数; (2) 在 330 nm 更短  $R_r(\lambda)$  随波长减少而减少, 表现出近似指数式减少的趋势; (3) 在 310 nm 更短的某个波长上, 许多情况下  $R_r(\lambda)$  出现逆转, 即随着波长减小而增大。这可能是由于仪器在短波段上的杂散光所致, 这一结果是不可靠的。

上述变化趋势需要我们用辐射传输的物理模式来进一步量化。当前已有的辐射传输模式算法在应用于紫外波段时一般误差较大, 这是因为气溶胶粒子在紫外波段的散射相函数具有极强的方向性。有关实际测量与模式计算对比的详细讨论我们将另行发表, 这里只给出一个测量与 DISORT 辐射传输模式<sup>[17]</sup>计算对比的个例。从对比看, 上述分析的趋势特征是清楚的。而 310~300 nm 的结果是由于杂散光造成的。

## 4 结论

(1) 所研制的紫外光谱辐射计已具有国际同类观测仪器的水平。由于具有总辐射和散射辐射两种观测模式的功能, 使观测数据除能提供绝对光谱辐射值作长时间变化分析外, 还有利于提供分析控制因素(臭氧含量、分子、气溶胶和云等)定量模型用的数据。

(2) 对 1992 年 5 月~1993 年 5 月的观测资料的统计分析表明, UV-B 和 UV-A 的瞬时总量的平均日变化可用大气质量  $m$  值的幂指数来表达。文中所提出的具体表达式可用以初步推算东北地区紫外(UV-B 和 UV-A)辐射值。Pinatobu 火山气溶胶的衰减作用亦清楚显示。

(3) 对晴天散射与总辐射比值光谱  $R_r(\lambda)$  的分析表明, 随着波长减短, 散射辐射在总辐射中的比例大为增加, 在 UV-B 段可能达到 80%。这对于考虑紫外辐射与生态系统相互作用的简化模式以及人体防护均有启发。

(4) 对晴天紫外光谱的时变比值谱  $R_r(\lambda)$  的分析表明, UV-A 段的变化趋势平缓单调, 而在 UV-B 段  $R_r(\lambda)$  随波长减小迅速减小, 并随  $m$  值有系统变化。与  $R_r(\lambda)$  的变化分析一样, 臭氧在 UV-B 段的吸收对这一变化趋势的形成起着控制作用。有关上述特征变化曲线的模式计算, 将是下一步的工作内容。

目前该项观测还在继续开展, 以获取 UV-B 光谱绝对辐射值长期变化的资料。事实上, 绝对光辐射记录亦可用以反演其他微量气体。有关云天紫外辐射的特征分析亦将在另文讨论。

致谢: 中国科学院长春光学精密机械研究所孙兰春同志对观测数据资料进行辐射定标预处理, 中国科学院大气物理研究所吴北婴研究员对本工作提供了资料并进行了有益的讨论, 特此一并致谢。

## 参 考 文 献

- 1 Bhutani, L. K., 1989, UV-B radiation and human health, *Indian J. Radio and Space Physics*, **18**, 306~308
- 2 Diffey, B. L., 1991, Review: solar ultraviolet radiation effects on biological systems, *Phys. Med. Biol.*, **36**(3), 299~328.
- 3 Frederick, J. E., H. E. Snell and E. K., Haywood, 1989, *Solar ultraviolet radiation at the earth's*, *Photochem.*

- Photobiol.* **50**(8), 443~450.
- 4 Frederick, J.E., 1993, Ultraviolet sunlight reaching the earth's surface: a review of recent research. *Photochem Photobiol.*, **57**, 175~178.
  - 5 Grant, W.B., 1988, Global stratospheric ozone and UVB radiation. *Science*, **42**, 1111~1112.
  - 6 Lubin, D. and J.E. Frederick, 1991, The ultraviolet radiation environment of the Antarctic Peninsula: the roles of ozone and cloud cover, *J. Appl. Meteorol. Biol.*, **30**, 478~493.
  - 7 Bittar, A. and R.L. McKenzie, 1990, Spectral Ultraviolet intensity measurement at 45°S: 1980 and 1988, *J. Geophys. Res.*, **95**(D5), 5597~5603.
  - 8 Madronich, S., 1992, Implications of recent total atmospheric ozone measurements for biologically active ultraviolet radiation reaching the earth's surface, *Geo. Res. Lett.*, **19**(1), 37~40.
  - 9 Scotto, J., G. Cotton, F. Urbach, D. Berger and T. Fears, 1988, Biologically effective ultraviolet radiation: surface measurements in the United States, 1974~1985. *Science*, **239**, 762~764.
  - 10 Stamnes, K., K. Henriksen and P. Ostensen, 1988, Simultaneous measurement of UV radiation received by the biosphere and total ozone amount, *Geo. Res. Lett.*, **15**(8), 784~787.
  - 11 Stamnes, K., J. Slusser and M. Bowen, 1990, Biologically effective ultraviolet radiation, total ozone abundance, and cloud optical depth at McMurdo Station, Antarctica, September 15, 1988 through April 15, 1989, *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 2181~2184.
  - 12 Webb, A.R., 1992, Spectral measurements of solar ultraviolet-B radiation in Southeast England. *J. Appl. Meteor.*, **31**, 212~216.
  - 13 Frederick, J.E. and E.C. Weatherhead, 1992, Temporal changes in surface ultraviolet radiation: a study of the Robertson-Berger meter and Dobson data records, *Photochem. Photobiol.*, **56**, 123~131.
  - 14 Frederick, J.E. 1992, An assessment of the Robertson-Berger ultraviolet meter and measurements: introductory comments. *Photochem. Photobiol.*, **56**, 113~114.
  - 15 Gardiner, B. G. and P. J. Kirsch, 1992, Second European Intercomparison of Ultraviolet Spectrometers, Panorama, Greece, 21~31.
  - 16 唐玉国, 1995: 同步辐射、壁稳氢弧紫外真空紫外光谱辐射标准的研究, 博士论文, 中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室.
  - 17 Stamnes, K., S.C. Tsay, W. Wiscombe and K. Jayaweera, 1988, A numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Appl. Opt.*, **27**, 2502.

## Observation and Analysis of Surface Ultraviolet (UV-A, UV-B) Spectral Radiances in Changchun

Lu Daren and Li Wei

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

Li Futian, Tang Yuguo and Ma Haitao

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

**Abstract** As one part of global research, surface UV Spectral radiance observation began in Changchun, China in May 1992 and later in Beijing. UV spectral radiance has been observed with an absolute-calibrated UV spectroradiometer developed by the Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science. This paper describes the instrument and the observation, analyzes the statistics of UV-B and UV-A radiances, the ratio spectra of diffused over global radiances as well as ratio spectra for different solar zenith angles. Observations are compared with calculations by radiative transfer models.

**Key words** UV Spectral radiance UV-B radiance UV spectroradiometer