

影响地面紫外辐射的因素分析*

王普才 吴北婴 章文星

(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 通过作者改进的离散坐标法(DISORT)辐射传输模式和部分观测资料考察了臭氧总量及其垂直分布、二氧化硫、气溶胶及火山气溶胶、地表反照率、太阳天顶角对到达地面紫外辐射的影响, 以及云与紫外辐射的相互作用, 给出了一些最主要的结果。此外, 还简要地介绍了国内外紫外辐射观测研究的一些进展, 特别是欧盟委员会资助开展的“确定UV-B辐射观测网标准”的科学计划。

关键词 紫外B辐射 辐射传输 模式 臭氧

1 引言

现代工业化过程对人类赖以生存的环境产生了重大的不利影响, 如大气污染、水污染、放射性污染、土地荒漠化, 并且大部分环境恶化是或难以逆转的。一些西方发达国家已经为他们的高度工业化在环境方面付出了沉重代价, 比如欧洲的一些工业密集的城市或地区, 地下水污染相当严重, 人们不得不以昂贵的代价从非常远的地方获得饮用水资源。现在这些国家认识到只顾发展工业、不妥善保护生存环境的严重后果, 已经投入了大量的人力物力开展保护生存环境的研究和应用有关研究成果保护、改善和治理环境, 并对国民进行保护生存环境的普遍教育。然而, 一些发展中国家, 包括中国, 在致力于现代化的同时, 环境污染也越来越严重, 这已经引起了政府和社会的密切关注。在人类生存的复杂环境之中, 紫外辐射也是一个重要方面, 它对人类的生命和日常活动会产生重要影响。目前地球两极地区出现的臭氧洞范围在扩大, 程度在加深, 相应的极区地面紫外辐射在迅速增加, 已经引起有关科学家的密切关注和深深忧虑。人类之所以没有遭受过量的紫外辐射, 是因为受到臭氧层的保护, 如果大气臭氧层这个“保护伞”遭受严重破坏, 人类将遭受强烈的紫外线曝晒, 产生十分不良的后果。卫星载 TOMS 仪器测量结果发现, 臭氧总量不仅在地球两极大量减少, 而且在中纬度近 15 年减少了 7%。我国科学家也发现, 青藏高原地区上空夏季也存在一个臭氧低值区^[1]。熊效振等^[2]的计算表明, 青藏高原夏季是 UV-B 高值区, 7 月份, 日总 UV-B 辐射可达 45 J/cm^2 。已有的科研成果告诉人们, 过量的紫外辐射对人类和地球表面的生命具有伤害作用, 首先, 它会引发人类的多种疾病, 包括皮肤癌发病率的大量增加; 其次, 它会伤害水中浮游生物, 大大降低水生生产力, 破坏鱼类的食物链基础, 导致水中蛋白质的大量减少, 进一步导致人类食物供应的短缺。

1997-09-15 收到, 1997-11-25 收到修改稿

* 本工作得到国家教育委员会留学回国人员科研启动基金和中国科学院回国人员工作基金的联合资助

Setlow^[3]和Caldwell等^[4]较早地研究了UV-B辐射对动、植物的生物作用,其光谱响应被称为作用谱,其生物作用剂量(dD/dt)可用作用谱($A(\lambda)$)和辐照度($I(\lambda)$)的卷积表示为

$$\frac{dD}{dt} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} f(\lambda) A(\lambda) d\lambda.$$

图1给出了红斑病(一种皮肤病)和DNA损伤的作用谱,并且大多数作用谱均表现了UV-B辐射具有重要的生物作用。

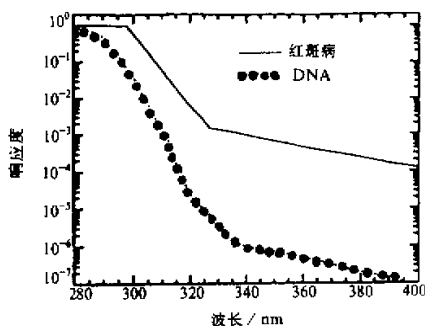


图1 红斑病和DNA损伤作用谱

的Fraunhofer特征谱线修正波长偏差。

80年代早期,新西兰的McKenzie紫外辐射研究小组就发展了紫外辐射光谱仪,通过多年的不断改进和严格测试,证明仪器是稳定可靠的^[8]。自从1989年以来,他们开始了常规监测,资料分析结果证实了南半球新西兰、澳大利亚等地上空臭氧总量减少,相应地面紫外辐射大量增加^[9]。

美国从1987年起就开始了用紫外辐射光谱计在南极地区布网监测紫外辐射,这个网络包括4个永久性观测站:麦克摩多(McMurdo),巴尔莫(Palmer)、阿曼森·司各特(Amundson Scott),阿根廷乌修西亚(Ushuasía)的科学观测南方中心站(CADIL)。

欧洲一些国家也较早开展了紫外辐射光谱的观测研究。奥地利英斯布鲁克(Innsbruck)大学的Blumthaler研究小组,德国的Seckmeyer研究小组都作了许多工作,还有英国、法国、挪威、比利时、荷兰、希腊等国科学家也开展了同样的观测研究。但是,当这些不同国籍的科学家走到一起,他们都感到存在一个共同的问题,他们各自获得的资料是难以进行绝对量比较的,因为它们的绝对辐射标准并不统一。为了解决这个问题,欧共体国家从事紫外辐射的科学家共同提出了“确定UV-B辐射监测网标准”的科学计划,获得了欧共体科学部的资助。这次计划导致了1991~1995分别在希腊帕罗拉玛(Panorama)、德国加尔米希·帕特科琛(Garmisch-Partenkirchen)、比利时布鲁塞尔和意大利伊赛皮拉(Ispira)的紫外光谱仪的比对活动^[10~12],获得了丰富的成果,使欧洲的紫外辐射观测水平提高到了一个新的高度。

美国较早地开展了紫外辐射的观测研究,当时使用的观测仪器绝大部分是Robertson-Berger宽带紫外辐射计,其响应谱与红斑灼伤作用谱相近^[5~7]。这种辐射计结构简单,价格便宜,容易维护和实现自动化观测,因此应用相当广泛。然而,它的观测不能满足科学家研究多种不同的生物作用对光谱的要求,频带的位置漂移也容易引起生物作用量的较大偏差,所以,近年来越来越多的科学家开展紫外辐射光谱的研究,以满足各种生物作用研究的要求,若观测波长存在漂移,也可以很容易地根据太阳光谱

我国也已经开展了紫外辐射光谱的观测工作。中国科学院大气物理研究所和长春光机所合作, 利用长春光机所研制的光谱辐射计, 分别在长春和北京地区开始了观测, 获得了大量的宝贵资料, 并取得了初步的分析研究成果, 为研究中国地区的紫外气候学打下了基础^[13]。

2 模式概述

模式研究是紫外辐射综合研究的一个重要方面, 是观测的重要补充。我们知道, 直接观测到的紫外辐射是大气各种因子共同作用的结果, 而通过模式研究可以分别研究大气各种因子如臭氧、气溶胶、云等对于地面紫外辐射的重要性。另外, 紫外辐射的光谱测量只在很少的几个点进行, 不能满足在大范围内建立紫外辐射环境的需要, 因此, 需要应用模式, 结合常规气象资料和卫星遥感资料, 通过模式计算弥补观测上的空白。

紫外辐射传输模式研究直到 80 年代后期和 90 年代才获得了快速发展^[14,15]。这是与整个的辐射传输模式理论的发展联系在一起的。80 年代, 辐射传输模式研究进展迅速, 著名的 LOWTRAN 6 和 7 就是这个时期发展起来的, 这里特别要提到的是 Chandrasekhar 提出的离散坐标方法经过 Liou 的发展, 又经过 Stamnes 等的发展, 已经趋于成熟^[16,17]。现在 Stamnes 等发展的 DISORT 程序已经广泛流传。王普才等^[18,19]较早利用 Stamnes 等的 DISORT 程序发展了一个紫外辐射传输模式, 这个模式适用于晴天, 也适用于云天。该模式能以与实测分辨率相当的 0.5 nm 的高分辨率模拟地面紫外光谱, 并在 10% 的偏差范围内与实际测量结果一致。利用该模式详细地研究了各种大气因子对紫外辐射的影响, 包括臭氧总量及其廓线、二氧化硫、气溶胶、火山气溶胶、地表反照率、云等, 一些主要结果在下面介绍。

3 各种因素对地面紫外辐射的影响分析

3.1 臭氧总量

臭氧总量是影响到达地面紫外辐射的最重要因子, 因为臭氧在 UV-B 波段存在很强的吸收带——哈特利(Hartley)和赫金斯(Huggins)带。为了更直观地看出臭氧总量对地面紫外辐射的影响, 我们做了这样一个模拟试验: 以正常臭氧总量 337 Du 作为参考, 依次让它变化 $\pm 10\%$ 、 $\pm 25\%$, 即在 168~505 Du 范围内变化。这个范围考虑到了臭氧大量减少的极端情况。我们分别用紫外辐射透过率和各种情况的透过率与参考情况的比值来考察地面紫外辐射对臭氧总量的响应。

图 2 给出了对应不同的臭氧总量的紫外辐射透过率, 图 3 给出了各透过率与对应参考总量的透过率的比值。从这两图中看到, 很明显臭氧总量的减少会导致地面紫外辐射的大量增加, 比如臭氧总量减少到一半, 则到达地面的紫外辐射在 290 nm 处将增强到 3 个数量级, 如果用具有生物学意义的产生红斑效应的紫外辐射剂量率表示, 则剂量率也被放大了许多倍。可见臭氧总量的变化, 特别是臭氧洞的出现, 对地面紫外辐射的影响之大。

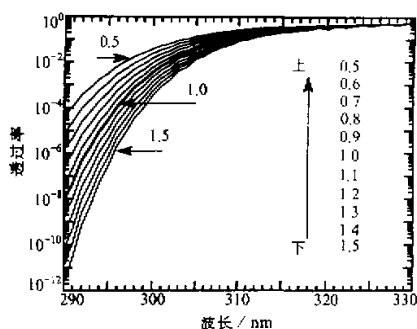


图2 对应不同大气臭氧总量的紫外辐射透过率, 臭氧总量为图中数字乘以正常臭氧总量 337 Du, 太阳天顶角 45°

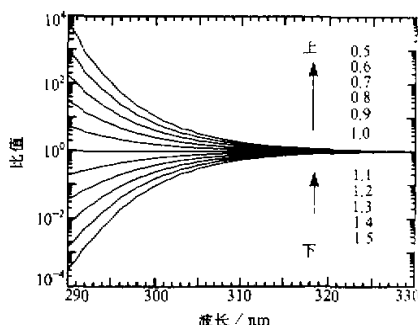


图3 不同大气臭氧总量与参考臭氧总量的紫外辐射透过率的比值, 对应于图2

3.2 臭氧垂直分布

臭氧总量的垂直分布在一定程度上影响到达地面的紫外辐射。同等的臭氧总量分布在不同高度上, 到达地面的紫外辐射是有差别的。当将正常的臭氧垂直分布向上移动、或向下移动 6 km, 相应的到达地面的紫外辐射的较大差别主要在 292~305 nm 之间, 达 10%; 对流层大气密度大且存在较多气溶胶, 分子和气溶胶都增加了散射, 所以对于同等臭氧柱含量对流层臭氧比平流层臭氧更有效地吸收紫外辐射, 因此对流层的臭氧增加会部分地掩盖平流层臭氧减少的信息提取。但对流层臭氧仅占总臭氧量的 10% 左右, 总体影响仍不大。

3.3 二氧化硫

就单个分子而言, SO_2 分子对 UV-B 的吸收是 O_3 分子吸收的 1~4 倍, 依赖于波长。但是, 大气中 SO_2 总量通常只有 O_3 总量的 1% 左右, 所以实际上 SO_2 的紫外吸收并不很强。但是, 如果我们考虑比较极端的情况, 比如大气遭到 SO_2 的严重污染, SO_2 总量可达 $2.3 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$, 则 SO_2 对 UV-B 的吸收可达 20%, 这个百分数在计算 UV-B 辐射时是不能忽略的, 否则将导致相当大的偏差。

3.4 气溶胶

为了考察气溶胶光学厚度对到达地面紫外辐射的影响, 固定太阳天顶角等于 45° , 对气溶胶光学厚度 ($0.55 \mu\text{m}$) 在 0~1.6 范围内变化的几种情况进行了辐射传输模拟, 结果给在图 4 中。可以看出, 中等厚度的气溶胶层 ($\tau=0.4$) 对紫外辐射的衰减达到 20% 左右, 较厚的的气溶胶层 ($\tau=0.8$) 对紫外辐射的衰减达到 30%, 另外这种衰减在 UV-A 波段对波长的依赖较弱, 即衰减是近似“中性”的, 而在 UV-B 波段, 由于分子和气溶胶的散射与臭氧强吸收的相互作用, 衰减对波长具有一定的依赖性。上述结果表明, 气溶胶对地面紫外辐射的影响是相当重要的。需要指出: 固定气溶胶光学厚度下, 太阳天顶角的增加将降低透过率, 但是, 太阳天顶角的变化对图 4 所示透过率比值影响不大, 模拟结果还表明, 到达地面的紫外散射辐射与总辐射之比依赖于波长, 但这种依

赖关系随气溶胶光学厚度的增加而减弱。

3.5 火山气溶胶

猛烈的火山爆发能向平流层输送大量的火山灰。1982 年 4 月墨西哥埃尔奇琼 (El Chichon) 和 1991 年 6 月菲律宾皮纳图博 (Pinatubo) 火山爆发是本世纪两次最大的火山爆发。到达平流层的火山灰能在平流层存留一年甚至更长的时间。SAGE II 卫星反演得到的皮纳图博火山爆发后最大气溶胶消光系数能达到本底的 50 倍、平流层气溶胶光学厚度从本底的 0.02 ($0.55 \mu\text{m}$) 左右增大到 10 倍, 达到 0.2。

模拟试验结果 (图 5) 表明, 火山气溶胶对地面紫外辐射的影响较为复杂, 与太阳天顶角有很大关系, 对达到地面的

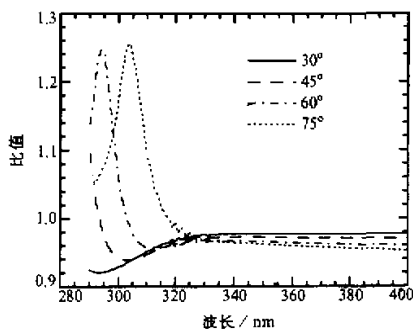


图 5 有火山气溶胶和无火山气溶胶的紫外辐射透过率的比值
图中数字表示太阳天顶角

紫外辐射的影响。模拟结果表明, 对于地表反照率小于 10% 的情况, 相应紫外辐射的增强小于 4%, 且较弱依赖于波长。但对于高地表反照率 (如冰、雪, ~ 0.8) 的情况, 地面紫外辐射增强十分可观, 可达 40%。在紫外, 大部分地表的地表反照率不高, 因此对地面紫外辐射影响不大。

3.7 云

云是人们熟悉的, 然而有时难以定量描述其辐射特性, 因为它的形状不规则, 而且它的时间、空间变化也非常大。这里只讨论一类比较均匀覆盖范围较大的中低云, 比如高层云、层云可归属于这一类。

云的光学特性与云滴谱关系很大, 不同种类的云有不同的云滴谱, 因此有不同的光

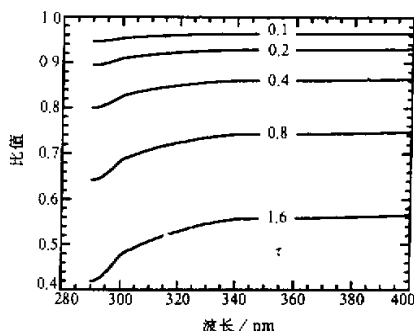


图 4 有气溶胶和无气溶胶的紫外辐射透过率的比值
图中数字是气溶胶光学厚度

与太阳天顶角有很大关系, 对达到地面的 UV-A 辐射减少约 4%, 而对于 UV-B, 减弱或增强, 与太阳天顶角和波长有关, 对于 45° 太阳天顶角在 295 nm 波长增加最明显, 增幅为 10%。对于 75° 太阳天顶角在 305 nm 波长, 增幅达 25%。这是火山气溶胶对于对流层向上紫外辐射的反射增强作用及光线所经路径衰减的综合作用造成的, 这一现象表明, 在强火山爆发后, 地面紫外辐射的峰值波长和幅度都会有变化, 值得引起研究者注意。

3.6 地表反照率

假定地表反射率在 0~0.8 范围内变化, 我们模拟了地表反照率对地面紫外辐射的影响。

模拟结果表明, 对于地表反照率小于 10% 的情况, 相应紫外辐射的增强小于 4%, 且较弱依赖于波长。但对于高地表反照率 (如冰、雪, ~ 0.8) 的情况, 地面紫外辐射增强十分可观, 可达 40%。在紫外, 大部分地表的地表反照率不高, 因此对地面紫外辐射影响不大。

学特性。我们对 10 种不同种类的云的滴谱进行 MIE 散射计算,发现单位液水的消光系数相近,差别小于 2%,并且散射不对称因子也相近,约为 0.79,差别小于 6%,因此可以认为相同光学厚度的不同种类的云的光学特性是一致的,从而可以用单一参数光学厚度描述不同形态的云。这个事实大大地简化了对云的研究。

我们用有云和无云的透过率比值来描述云对地面紫外辐射的影响,并依次考察了有云情况下,地表反照率、太阳天顶角、分布高度、光学厚度对地面紫外辐射的影响。

高地表反照率对地面紫外辐射的影响是很大的,因为高反照率的地表和高反射率的云层的来回内反射可使地面紫外辐射增加许多倍。然而,对于大部分情况,地表反射率都是比较低的,对地面紫外辐射影响不大。

我们所试验的中低云在不同的太阳天顶角下,对紫外辐射的减弱几乎是不变的,且较弱依赖于波长,是近似中性的,这是云的中性散射特性决定的。

不同高度上具有同样光学厚度和散射不对称因子的中低云层对到达地面紫外辐射的减弱是几乎一样的,即地面紫外辐射与中低云层的位置高度几乎没有关系。

云层的光学厚度确定了对到达地面的紫外辐射的减弱(见图 6)。光学厚度为 5 的云(薄云)减弱地面紫外辐射约 35%,光学厚度为 10 的云(较薄云)减弱地面紫外辐射约 50%,光学厚度为 80 的云(厚云)减弱地面紫外辐射约 90%,并且这种减弱是近似中性的,与波长近似无关。云层光学厚度与地表反照率对地面紫外辐射的共同影响显示在图 7 中。

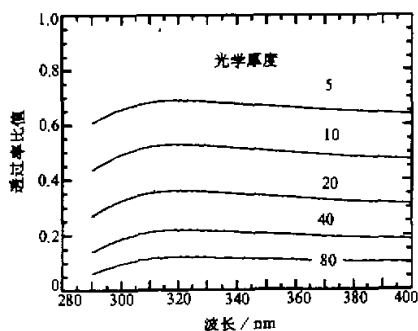


图 6 对应不同云光学厚度的紫外辐射透过率比值,图中数字表示云光学厚度,太阳天顶角 45° ,地表反射率 0.05

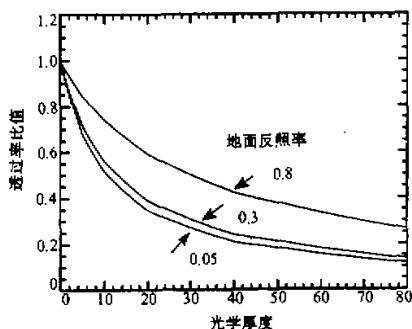


图 7 透过率比值与云光学厚度和地表反射率之间的关系,波长 340 nm,太阳天顶角 45°

4 总结

由于近 20 年辐射传输理论的发展和成熟,计算机技术的飞速发展,以及大气各种成分的分子光谱数据库的完善,紫外辐射传输模式目前已趋于成熟,能够相当好地模拟各种因子的变化对到达地面紫外辐射的影响。

在各种影响地面紫外辐射的因子之中,臭氧总量减少会导致地面紫外辐射快速增

加。对流层臭氧比平流层能更有效地吸收紫外辐射。 SO_2 在通常情况下, 由于其相对较小的总量, 对紫外辐射的影响可以忽略, 但是在大气被 SO_2 极端污染的情况下, 仍可以吸收相当多的紫外辐射。气溶胶在紫外波段上均匀减弱紫外辐射, 而火山气溶胶由于其较高的分布位置, 对于较大的太阳天顶角, 反而增强短波长 ($< 320 \text{ nm}$) 紫外辐射。增幅可达 $10\% \sim 25\%$ 。这一现象表明在强火山爆发后, 晴空条件下地面紫外辐射会有可观增加, 其峰值波长也会变化, 值得引起各种紫外辐射预报模式研究注意。高地表反照率会明显增强地面紫外辐射。除了高云和碎云以外大部分云层由于其光学厚度较厚、能够有效地阻挡紫外辐射, 这种阻挡与地表反照率关系极大, 而在云达到一定厚度后与太阳天顶角关系不大。

致谢: 法国里尔科技大学的 J. Lenoble 教授对此工作给予很大帮助。

参 考 文 献

- 1 周秀骥、罗超、李维亮、史久恩, 1995, 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心, 科学通报, 40(15), 1396~1398.
- 2 熊发振、王庚辰, 1993, 中国地区近地面太阳紫外辐射的分布及其对大气臭氧层破坏的响应, 大气科学, 17, 611~620.
- 3 Setlow, R. B., 1974, The wavelengths in sunlight effective in producing skin cancer: a theoretical analysis, *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, 71, 3363~3366.
- 4 Caldwell, M. M., L. B. Camp, C. W. Warner and S. D. Flint, 1986, Action spectra and their key role in assessing biological consequences of solar UV-B radiation change, Stratospheric Ozone Reduction, in: *Solar Ultraviolet Radiation and Plant Life*, edited by R. C. Worrest and M. M. Caldwell, Springer-Verlag, Berlin, 87~111.
- 5 Berger, D., 1976, The sunburning ultraviolet meter: design and performance, *Photochemistry and Photobiology*, 24, 587~593.
- 6 Berger, D., 1980, The sunburn UV networks and its applicability for biological predictions. In J. Calkins(ed.), *The Role of Solar Ultraviolet Radiation in Marine Ecosystems*, NATO Conference Series IV, *Marine Science*, 7, Plenum, New York, 181~192.
- 7 Berger, D. and M. Morys, 1992, UV-Biometer—a broad-band instrument complementing ozone measurements with ground based UV exposure, presented at the Quadrennial Ozone Symposium, Charlottesville, Virginia, USA, 4~13.
- 8 McKenzie, R. L., P. V. Johnston, M. Kotkamp, A. Bittar and J. D. Hamlin, 1992, Solar ultraviolet spectrometry in New Zealand: instrumentation and sample results from 1990, *Appl. Opt.*, 31, 6501~6509.
- 9 McKenzie, R. L., M. Kotkamp, G. Seckmeyer, R. Erb, C. R. Roy, H. P. Gies and S. J. Toomey, 1993, First southern hemispheres intercomparison of measured solar UV spectra, *Geophys. Res. Letters*, 20, 2223~2226.
- 10 Gardiner, B. G. and P. J. Kirsch, 1992, European Intercomparison of Ultraviolet Spectrometers, Panorama, Greece, 3~12 July, 1991, *Air Pollution Research Report* 38, Commission of the European Communities, Directorate-General for Science, Research and Development, Brussels, 70pp.
- 11 Gardiner, B. G. and P. J. Kirsch, 1994, Second European Intercomparison of Ultraviolet Spectrometers, Panorama, Greece, 21~31 August 1992, *Air Pollution Research Report*, 49, 67pp.
- 12 Gardiner, B. G. and P. J. Kirsch, 1994, Setting Standards for European Ultraviolet Spectroradiometers, Report to the Commission of the European Communities, STEP~076.
- 13 吕达仁、李卫、李福田、唐玉国、马海涛, 1996, 长春地区紫外光谱 (UV-A, UV-B) 辐射观测和初步分析, 大气科学, 20, 343~351.
- 14 Frederick, J. E. and D. Lubin, 1988, The budget of biologically active ultraviolet radiation in the earth-atmospheres system, *J. Geophys. Res.*, 93, 3825~3832.

- 15 Frederik, J. E. H. E. Snell and E. K. Haywood, 1989, Solar ultraviolet radiation at the earth surface, *Photochemistry and Photobiology*, **50**, 443~475.
- 16 Liou, K. N., 1973, A numerical experiment on Chandrasekhar's discrete-ordinate method for radiative transfer: applications to cloudy and haze atmosphere, *J. Atmos. Sci.*, **30**, 1303~1326.
- 17 Stamnes, K., S. C. Tsay, W. J. Wiscombe and J. Jayaweera, 1988, Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media, *Appl. Opt.*, **27**, 2502~2509.
- 18 Wang Pucai and J. Lenoble, 1994, Comparison between measurements and modeling of UV-B irradiance for clear sky: a case study, *Appl. Opt.*, **33**, 3964~3971.
- 19 Wang Pucai and J. Lenoble, 1996, Influence of clouds on UV irradiance at ground level and backscattered exitance, *Advances in Atmospheric Sciences*, **13**(2), 217~228.

Analysis on the Factors Affecting Surface UV Radiation

Wang Pucai, Wu Beiyong and Zhang Wenxing

(Laboratory for Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The influence of total ozone amount and its vertical distribution, SO_2 , aerosols and volcanic aerosols, solar zenith angle to surface UV (UV-B and UV-A) radiation and the interaction between clouds and UV radiation have been studied using the improved DISORT radiative transfer model by the author. Some main results have been presented. In addition, some activities enhancing the study and observation of UV radiation in China and other countries have been briefly introduced, including the study of "Determination of Standards for a UV-B Monitoring Network" supported by the Commission of the European Communities.

Key words UV-B radiation radiative transfer model ozone