



# 天文台址紫外波段大气透过率获取方法

曾洋<sup>1</sup>, 卢利根<sup>1,2\*</sup>, 张保洲<sup>1,2</sup>

1. 北京师范大学天文系, 北京 100875;

2. 北京师范大学应用光学北京市重点实验室, 北京 100875

\*联系人, E-mail: reaganlu@bnu.edu.cn

收稿日期: 2022-02-10; 接受日期: 2022-04-15; 网络出版日期: 2022-07-19

国家自然科学基金(编号: 11803003, U2031209)资助项目

**摘要** 大气紫外透过率是反应紫外波段大气光学特性的关键参数, 对于开展地面紫外天文观测, 尤其是相应台站的选址、望远镜和终端设备建设具有重要的指导意义. 文中详细介绍了目前获取紫外波段大气透过率的方法和原理, 并对软件模拟和仪器测量两种主要方法进行了比较和分析. 同时提出将月球作为夜间大气透过率测量的观测对象, 分析其可行性和应注意的问题.

**关键词** 大气透过率, 紫外波段, 软件模拟, 太阳辐射计, 恒星辐射计

**PACS:** 42.68.Ay, 95.85.Ls, 92.60.Aa, 95.55.Ev, 95.55.Qf

## 1 引言

通过紫外波段的电磁辐射来对目标天体进行观测研究, 产生了天文学的一个重要分支, 即紫外天文学. 紫外辐射介于可见光与X射线之间, 波长范围为10–400 nm<sup>[1]</sup>. 紫外观测在全波段天文学中具有重要意义, 如解析高电离的硅、氧、铁等元素吸收谱线, 是研究星冕、色球及二者过渡区层元素丰度与恒星活动的重要工具. 此外, 对于中性及电离态的原子而言, 其从激发态跃迁至基态产生的共振线在紫外波段相比于可见光波段要更加丰富, 共振线包含了大量辐射及传播过程中的信息, 通过紫外光谱能够研究星际介质的元素丰度、化学成分、密度及温度, 同时也能为研究宇宙区域的化学丰度和恒星的元素演化提供重要信息.

目前对于紫外探测的研究成果, 大部分来源于紫外空间望远镜. 由于地球大气的组成成分所形成的散射吸收特性, 对于紫外波段的大气传输可分为无法到达地表的“真空紫外”(短于200 nm)、到达地表基本为零的“日盲区”(200–280 nm)和能到达地表的“紫外窗口”(280–400 nm). 因此, 地面望远镜开展紫外探测主要集中在“紫外窗口”范围内. 尽管如此, 地面紫外探测对天文观测仍具有重要意义. 一方面是因为近紫外是地面天文学的一个有效窗口, 能够为研究太阳活动、早型星和白矮星、星系恒星形成等提供丰富的信息<sup>[1]</sup>. 另一方面, 在空间探测费用高、技术难度大的情况下, 地面紫外探测是容易实施、更为可行的手段. 因此, 在一些具有紫外观测潜力的台站, 如南极或高海拔地区, 可以结合望远镜的科学目标尽量将望远镜的观

**引用格式:** 曾洋, 卢利根, 张保洲. 天文台址紫外波段大气透过率获取方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 289509

Zeng Y, Lu L G, Zhang B Z. Acquisition methods for ultraviolet atmospheric transmittance at astronomical sites (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 289509, doi: 10.1360/SSPMA-2022-0061

测波段往短波端延伸.

而要做到这一点, 在望远镜设计及研制紫外探测设备时, 就很有必要对望远镜所在台站的紫外波段大气透过率进行准确的测量和评估, 来确保地面望远镜在“紫外窗口”开展观测的可行性, 为地面紫外探测设备的选址、观测提供依据和保证.

目前获取大气透过率的方法主要包括软件模拟和仪器测量两类, 本文对两种方法的原理、各自包含的具体方式进行了简要介绍, 比较和分析了各种方法的特点.

## 2 软件模拟

### 2.1 大气辐射学基本理论

辐射在地球大气中传输会受到不同程度的衰减, 考虑通过密度为 $\rho$ 、长度为 $dl$ 的路径, 入射辐射通过大气衰减的强度为<sup>[2]</sup>

$$dI(\lambda, l) = -I(\lambda, l)\rho k(\lambda, l)dl, \quad (1)$$

其中,  $k(\lambda, l)$ 为衰减系数, 是散射衰减和吸收衰减作用的总和, 所以

$$k(\lambda, l) = k_{ab}(\lambda, l) + k_{sc}(\lambda, l). \quad (2)$$

大气透过率 $T(\lambda, l)$ 可由衰减系数计算得到

$$T(\lambda, l) = \exp\left[-\int_0^l \rho k(\lambda, l)dl\right]. \quad (3)$$

#### 2.1.1 散射

大气散射主要包括瑞利散射和气溶胶散射.

瑞利散射的散射粒子尺度远小于所对应的辐射波长, 对大气不同高度 $z$ 上的瑞利散射光强度可表示为<sup>[3]</sup>

$$I(\lambda, z) = \frac{24\pi^3 N(\lambda, z) v^2 \left[ n_1(\lambda, z)^2 - n_0(\lambda, z)^2 \right]^2}{\lambda^4 \left[ n_1(\lambda, z)^2 + 2n_0(\lambda, z)^2 \right]^2} I_0, \quad (4)$$

其中,  $I(\lambda, z)$ 为散射光强度,  $N(\lambda, z)$ 为大气分子数密度,  $v$ 为单个散射粒子体积,  $n_1(\lambda, z)$ 和 $n_0(\lambda, z)$ 分别表示分散相和分散介质的折射率<sup>[4]</sup>.

从式(4)中可以看出, 瑞利散射的光强度与波长的

四次方成反比. 因此, 紫外波段的瑞利散射作用比可见光波段更强, 若不考虑其他散射和吸收, 大气紫外透过率要更低得多.

气溶胶散射是大气中悬浮的各种半径为 $0.001-100 \mu\text{m}$ 的固体、液态粒子导致的散射, 气溶胶散射特性取决于气溶胶的化学成分、粒子半径等. 气溶胶特性与气溶胶发散源类型和分布、下垫面结构、气候、地理位置等气象因素相关. 定量描述气溶胶粒子光学特性的重要前提就是描述其尺度谱分布, 由于实际粒子的不规则性, 只能对其进行简单的近似描述. 其中最广泛应用的是由德国科学家Junge通过统计分析实际观测资料提出的简单幂尺度谱函数, 简称Junge谱<sup>[5]</sup>. Junge谱适用于气溶胶粒子半径 $0.1-2 \mu\text{m}$ 的洁净大气, 当气溶胶尺度谱型函数(单位体积中气溶胶粒子数量随粒子大小分布的函数)、粒子尺度不随高度变化, 而粒子数密度随高度指数衰减时, 可以得到高度 $z$ 处气溶胶消光系数和散射系数<sup>[5]</sup>.

#### 2.1.2 分子吸收

分子吸收谱线, 由于粒子的量子效应表现为钟形分布而非单个波长的吸收线, 在中心波长吸收最强, 往两侧线翼迅速减弱, 通过线型函数来描述谱线分布<sup>[6]</sup>. 现实中谱线线宽会出现两种形式的展宽, 分别为低气压下占主导的多普勒展宽和高气压下占主导的碰撞致宽(洛伦兹展宽). 两种展宽同时作用, 线型函数为两种展宽的卷积形式, 即Voigt线型<sup>[7]</sup>. 对于大气中分子的吸收, 通常有下面三种算法.

带模式法是一种为了提高分子吸收光谱的计算速度而进行简化的大气分子吸收算法, 通过划分光谱将特定间隔内的分子吸收进行快速近似. 假设辐射传输路径内吸收分子含量均匀, 谱线半宽远小于波段间隔 $\Delta\nu$ , 在 $\Delta\nu$ 内入射辐射不随 $\nu$ 变化, 此时有

$$\overline{T}_{\Delta\nu}(k_\nu, u) = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-k(\nu)u} d\nu, \quad (5)$$

其中,  $u$ 为光学质量, 随气体分子种类而定, 衰减系数 $k(\nu)$ 随大气状态取不同的函数形式.

逐线积分法是到目前为止计算大气分子吸收最精确的算法. 它在整个积分路径上采用Voigt线型, 在每一高度分层的内部, 直接累加计算波数 $\nu$ 处所有参与吸收的分子的贡献<sup>[8]</sup>.

$$k_j(\nu) = \sum_i k_i(\nu) = \sum_i S_i g(\nu - \nu_i), \quad (6)$$

$$k(\nu) = \sum_j k_j(\nu), \quad (7)$$

其中,  $k_i(\nu)$  为单个吸收线衰减强度,  $S_i$  为单个吸收线线强,  $k_j(\nu)$  为单层层大气吸收线衰减强度,  $g(\nu - \nu_i)$  为对应的线型函数.

这种直接对光谱本身的数据进行计算的方法, 能有效地处理非均匀路径的吸收和气体分子的重叠吸收.

K分布方法, 根据事先设定的波数间隔  $\Delta \nu_i$  统计各个吸收系数出现的频数即K分布, 得到分布函数  $h_i(k)$ , 分布函数满足归一化条件:

$$\int_{\lg k_{\min}^i}^{\lg k_{\max}^i} h_i(\lg k) d\lg k = 1, \quad (8)$$

其中,  $\lg k_{\min}^i$  和  $\lg k_{\max}^i$  分别为第  $i$  个间隔  $\Delta \nu_i$  中  $\lg k$  的极大值和极小值.

K分布方法在  $\Delta \nu_i$  内对  $k$  求积得到透过率:

$$\overline{T}_{\Delta \nu} = \int_{\lg k_{\min}^i}^{\lg k_{\max}^i} e^{-ku} h_i(\lg k) d\lg k. \quad (9)$$

这种方法相对于带模式算法计算精度更高, 相对于逐线积分法计算速度更快.

上述三种计算分子吸收的方法中, 逐线积分法在缺乏实验精确数据前提下, 是带模式法和K分布方法最标准的参考模型<sup>[8]</sup>.

## 2.2 计算模型

软件计算是通过地球大气进行建模的基础上, 将各种大气条件参数化, 从而可以通过调整对应参数模拟相应条件下的大气辐射传输过程. 目前, 在波长范围上包括紫外波段的模型和软件主要有以下几种.

### 2.2.1 6S模型

6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)模型由1990年Tanré等人提出的5S (Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum)计算模型改进而来<sup>[9,10]</sup>. 5S模型适用于晴朗无云天气

下、非朗伯体地表的辐射特性, 模拟波长范围250–4000 nm, 能够计算太阳辐射的大气反射、大气透过率和地表辐照度等. 6S模型在5S模型基础上改进了瑞利散射和气溶胶散射算法, 波长覆盖紫外至近红外, 采用连续散射算法(SOS)求解大气传输方程, 并且光谱积分步长缩小至2.5 nm<sup>[11]</sup>. 6S模型通过收集大量实测数据, 模拟不同条件下遥感信号的完整传输过程, 来提高遥感探测的精确性<sup>[12]</sup>.

6S模型主要考虑了太阳、探测器、地表反射体之间的几何关系, 对于大气吸收率则通过随机指数分布统计的方法, 统计各种大气粒子、气溶胶的吸收特性, 来模拟各种条件下的辐射吸收率<sup>[12]</sup>.

### 2.2.2 LOWTRAN

LOWTRAN (低光谱分辨率大气透过模式计算模式)是20世纪70年代美国地球物理实验室McClatchey等人开发, 通过Fortran语言编写, 用于计算地球大气透过率和出射辐射亮度, 最新版为1989年开发的LOWTRAN7版本<sup>[13]</sup>. 其模拟分辨率为20 cm<sup>-1</sup>, 通过插值每5 cm<sup>-1</sup>给出一组数据, 光谱范围0–50000 cm<sup>-1</sup> (200 nm–∞). 采用单一参数的带模式法模拟分子吸收, 对于某一光路而言, 将大气分为一系列相接的薄层, 每一薄层对应各自高度、气压、温度、大气分子数密度和气溶胶密度, 各薄层边界温度呈线性变化, 气压及粒子密度呈指数变化, 同样边界折射指数也呈指数变化<sup>[14]</sup>. 同时, 将海平面至100 km的大气分为4层, 分别为0–2, 2–10, 10–30和30–100 km, 每层内又分各自的气溶胶类型<sup>[13]</sup>.

作为一种低分辨率的大气传输模型, LOWTRAN在带基模型基础上结合经验数据计算, 模拟参数输入选择多样, 简单且能满足一般性的模拟<sup>[14]</sup>.

### 2.2.3 MODTRAN

MODTRAN是由LOWTRAN改进而来, 在保留LOWTRAN全部功能的同时, 分辨率提高到2 cm<sup>-1</sup>, 并采用HITRAN (高分辨率透射率谱线)数据库, 考虑了大气折射与地球曲率的影响. MODTRAN能模拟计算0–50000 cm<sup>-1</sup> (200 nm–∞)范围的大气背景辐射亮度和透过率. 从MODTRAN5开始, 光谱分辨率提高至0.2 cm<sup>-1</sup>, 此外还增加了快速多次散射快速算法, 通过3个参数的带模式算法, 使分子透过率计算更加精

确<sup>[15]</sup>. MODTRAN通过二流近似算法计算气溶胶多次散射效应, 采用Curtis-Godson近似, 将连续多层的分层路径等价于均匀路径<sup>[16]</sup>. 龚俊等人<sup>[17]</sup>分别采用LOWTRAN和MODTRAN进行了(乡村气溶胶模型、中纬度夏季大气模型、无风雨条件下)紫外波段(200–400 nm)的大气透过率模拟计算, 并将结果进行了对比, 表明MODTRAN的计算结果更加准确.

MODTRAN采用的HITRAN数据库是大气中气体成分的光谱参数的汇编, 覆盖从紫外到红外的几百万条吸收谱线的19个具体参数, 用于模拟气态介质中光的传输和发射, 最新版为HITRAN2020版本<sup>[18,19]</sup>. 它通过实验室数据, 得到分子光谱参数, 在各种光谱分析中作为参考的标准, 同时应用在模拟辐射传输中, 替代辐射谱的理论计算. 此外HITRAN数据库还有用于适应高温条件下的HITEMP (高温气体数据库)的分支版本.

## 2.2.4 FASCODE

FASCODE (Fast Atmospheric Signature Code)是一种快速计算的高分辨率大气辐射传输模型, 最先由美国空军地球物理实验室(AFGL)通过Fortran语言编写, 能以非常高的光谱分辨率及计算精度模拟0–50000  $\text{cm}^{-1}$  (200 nm– $\infty$ )光谱范围的大气透过率与大气背景辐射<sup>[20]</sup>. FASCODE基于HITRAN数据库的分子谱线, 完全以逐线积分法“精确”计算大气透过率. 通过对不同线型的大气分层采用不同的波数间隔, 提高了透过率的计算速度, 同时保证了不同高度的计算精度. 同时, FASCODE考虑了高层大气的非局部热平衡状态, 理论上对于大气透过率的计算没有高度上限, 因此经常作为高分辨率光谱大气整层透过率计算软件, 同时也是评估遥感系统或参数化带模型的标准<sup>[20]</sup>.

FASCODE传输模型中包含了从LOWTRAN已经建立的粒子模型, 描述了大气温度、气压、密度、分子密度及混合比的垂直廓线, 同时对下垫面类型进一步细分<sup>[21]</sup>. 此外FASCODE提供多种扫描函数和自定义滤波函数, 来计算各组分的权函数<sup>[22]</sup>.

## 2.2.5 LBLRTM

LBLRTM (Line-By-Line Radiative Transfer Model)是由剑桥市大气与环境研究公司(AER)基于FASCODE派生的一种准确有效的逐线积分辐射传输模型<sup>[23]</sup>. LBLRTM通过引入中继算法, 提高了辐射传输

的准确性和计算速度, 对新的分子吸收带和连续谱以及原有分子数据的更新也进行了整合<sup>[16]</sup>. LBLRTM计算光谱范围为0–50000  $\text{cm}^{-1}$  (200 nm– $\infty$ ), 算法精度约为0.5%, 光谱分辨率为0.01  $\text{cm}^{-1}$ , 并且吸收线参数误差比计算程序误差大五倍左右, 因此一般认定误差主要来源为吸收线参数与线型<sup>[24]</sup>.

LBLRTM同样使用HITRAN数据库, 应用Voigt线型与线性组合算法结合用于线性逼近, 采用连续介质模型MT\_CKDLBLRTM. 针对斜程路径, 提出了一种用于处理非垂直均匀层内普朗克函数的变化的算法, 提高计算效率, 降低了逐线积分通量和冷却速率计算的计算负担<sup>[25,26]</sup>.

## 2.2.6 SCIATRAN

SCIATRAN辐射传输模型是基于GOMETRAN模型的下一代模型, 由Fortran语言编写, 最初开发用于从SCIAMACHY卫星光谱仪的全球天底辐射测量中反演大气成分, 模拟大气反向散射和地表反射的大气辐射, 具体数据由全球臭氧检测实验测量<sup>[27]</sup>. 最新SCIATRAN模型覆盖范围扩展至175 nm–40  $\mu\text{m}$ , 包含氧的舒曼-龙格(Schuman-Runge)吸收带(125–202.6 nm)和赫茨伯格(Herzberg)吸收带(242–260 nm), 此外还可根据计算需要通过ESFT (透射指数与拟合数据库)选择不同的光谱分辨率进行拟合<sup>[28,29]</sup>. 赵莹<sup>[30]</sup>采用SCIATRAN进行了UV-B波段(280–325 nm)的紫外辐照度模拟计算, 与地面观测数据进行对比, 分析了地表紫外辐照度对不同参数的敏感性.

SCIATRAN使用K分布方法计算分子吸收<sup>[31]</sup>. 此外, SCIATRAN能对大气透射、散射、反射和发射辐射的强度或斯托克斯矢量的光谱和角度分布进行建模, 同时适用于平面平行、伪球面、近似球面和球面模式下运行<sup>[32]</sup>.

# 3 仪器测量

## 3.1 测量基本原理

按照透过率的定义, 大气透过率是地面接收到的辐射通量与入射到大气层顶处的辐射通量之比, 因此使用仪器测量大气透过率本质上就是获得这两个辐射通量的值.

实际应用中, 通常选择太阳或恒星作为测量对象.

太阳或恒星经过整层大气到达地面的辐照度 $E(\lambda)$ 可以表示为

$$E(\lambda) = E_0(\lambda) \exp[-\tau(\lambda)m(z)], \quad (10)$$

式中,  $E_0(\lambda)$ 是太阳或恒星在大气层顶处的辐照度,  $\tau(\lambda)$ 是天顶方向的大气光学厚度,  $z$ 是天顶距,  $m(z)$ 是大气质量.

因此, 对某一特定方向(天顶距 $z$ ), 在某一时刻用仪器测量得到 $E(\lambda)$ 就可以计算测量方向的斜程大气透过率 $T(\lambda)$ 和整层大气的垂直透过率 $T_0(\lambda)$ , 即

$$T(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{E_0(\lambda)} = \exp[-\tau(\lambda)m(z)], \quad (11)$$

$$T_0(\lambda) = \left[ \frac{E(\lambda)}{E_0(\lambda)} \right]^{1/m(z)} = \exp[-\tau(\lambda)]. \quad (12)$$

按上面公式完成计算还需要确定 $E_0(\lambda)$ , 即假设仪器在大气层顶处以自身光谱响应曲线测量得到的来自太阳或恒星的辐照度. 确定 $E_0(\lambda)$ 的过程实际上就是仪器完成定标的过程.

目前广泛使用的定标方法有Langley-plot定标法和标准光源法. 标准光源法主要用在实验室中, 用标准灯来提供已知的 $E_0(\lambda)$ , 结合仪器的响应输出就可以确定定标系数. 只是标准光源法的定标温度、湿度和野外测量时差别较大, 标准灯和实际测量对象的光谱分布也可能明显不同, 这些因素对测量结果的影响较大. 因此, 对于在野外测量的大气透过率测量仪器, 通常采用的是Langley-plot定标法.

将式(10)两边取对数, 得到

$$\ln E(\lambda) = \ln E_0(\lambda) - \tau(\lambda)m(z). \quad (13)$$

选择天气晴朗、大气稳定的天气进行测量, 测量不同天顶距 $z$ 下太阳或恒星的辐照度 $E(\lambda)$ . 天顶距 $z$ 可以由仪器的跟踪装置给出, 或者根据观测地经纬度和时间由太阳或恒星的天球坐标换算关系得到. 当 $z \leq 60^\circ$ 时,  $m(z) \approx \sec z$ ; 当天顶距 $z$ 比较大时, 应当考虑大气层的弯曲,  $m(z)$ 的一种简化计算公式为

$$m(z) = \sec z - 0.001867(\sec z - 1) - 0.002875(\sec z - 1)^2 - 0.0008683(\sec z - 1)^3. \quad (14)$$

然后以 $m(z)$ 为横坐标,  $\ln E(\lambda)$ 为纵坐标, 对式(13)作图, 可以得到一条斜率为 $-\tau(\lambda)$ 、截距为 $\ln E_0(\lambda)$ 的直线. 这种确定仪器 $E_0(\lambda)$ 的方法称为Langley-plot定标法.

## 3.2 常用测量仪器

直接测量大气透过率的常用仪器可按照测量对象的不同分为白天的太阳辐射计和夜间的恒星辐射计.

### 3.2.1 太阳辐射计

太阳辐射计是一种用于测量地面太阳辐照强度的仪器, 通常设计为直接指向太阳, 只测对准太阳的直接辐射, 而不测量其他方向由天空产生的散射光, 因而其视场一般为 $1^\circ$ – $3^\circ$ . 太阳辐射计是地面获取太阳辐照强度、整层大气透过率、气溶胶光学厚度和大气水汽总量的主要手段之一. 按照测量方式的不同, 太阳辐射计可分为积分型和光谱型. 积分型通常为通道式辐射计, 每个通道有各自的中心波长和带宽, 单通道更换滤光片或直接多通道便可实现较宽波段范围内的大气透过率多点测量. 光谱型则采用扫描式光谱仪或采用阵列探测器, 可测量太阳辐射一定波段范围内的连续光谱, 进而得到相应波段内的光谱透过率.

太阳辐射计发展较为成熟, 国内外均有市场化的测量仪器. 日本PREDE公司的POM系列辐射计, 覆盖315–2200 nm的11个通道, 其中属于紫外的有315和340 nm两个通道<sup>[33]</sup>; 法国CIMEL公司的CE318太阳辐射计, 覆盖340–1640 nm的9个通道, 其中属于紫外的有340和380 nm两个通道<sup>[34]</sup>; 日本Kippzonen公司的全波段光栅光度计PGS-100属于光谱型, 测量范围350–1050 nm, 半功率带宽3.6 nm, 波长精度0.5 nm. 黄煜等人<sup>[35]</sup>特别针对紫外波段研制了扫描式太阳光谱辐射计, 工作波段250–400 nm, 视场角 $1.5^\circ$ , 用于测量太阳直射紫外光谱辐照度, 并在云南丽江进行了观测实验.

### 3.2.2 恒星辐射计

太阳辐射计用于白天测量, 夜晚则可以利用恒星辐射计(积分型/光谱型)测量大气透过率. 与太阳辐射计最大的差别在于, 太阳辐射计的测量对象唯一, 仪器的 $E_0(\lambda)$ 理论上只需一次定标(不考虑仪器变化), 而恒星辐射计可以选择不同的测量对象, 但不同的恒星不仅星等不同, 而且光谱型可能不同. 当选择不同的恒星测量时, 星等不同则仪器的 $E_0(\lambda)$ 就不同, 即使用星等差进行换算还需考虑光谱型是否相近的问题. 因此, 恒星辐射计的定标需要特殊处理: 即对于相同或

相近光谱型的恒星, 应选定一颗恒星进行一次定标, 才能对相同或相近光谱型的其他恒星进行观测.

假设恒星1和恒星2是光谱型相同或相近的两颗恒星, 星等差 $m_1 - m_2 = \Delta m$ . 先以恒星1为测量对象进行Langley-plot定标, 可得到恒星1大气层顶处的 $E_{01}(\lambda)$ . 当以恒星2作为测量对象进行测量时, 其 $E_{02}(\lambda)$ 可按普森公式计算:

$$E_{02}(\lambda) = E_{01}(\lambda) \times 10^{0.4 \times \Delta m}, \quad (15)$$

如此, 便可利用恒星辐射计对多个恒星目标进行测量.

国内詹杰等人<sup>[36,37]</sup>设计了一台夜间利用恒星测量整层大气透过率的测量系统, 使用带宽50 nm、中心波长分别为300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750 nm的滤光片组, 通过望远镜和增强CCD (ICCD)来测量恒星的微弱辐射.

### 3.2.3 月球辐射计

夜间利用恒星测量紫外波段大气透过率时, 恒星辐射强度要远远小于太阳的辐射强度, 光信号强度的巨大差别对测量仪器的光学结构和探测器都提出了更高的要求. 为了使夜间的紫外透过率测量更易实施, 把月球作为测量对象也是一种选择和补充. 已有的观测表明, 恒星在NUV波段(165–290 nm)的星等值都较大, 其到达地面的紫外辐照度远低于月球<sup>[38]</sup>. 根据太阳辐射和气候实验(SORCE)对月球光谱辐照度的测量结果, 在300 nm处, 在大气外来自月球的光谱辐照度约为 $10^{-5} \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \text{ nm})$ , 比太阳的相应值低6个量级<sup>[39]</sup>. 而根据紫外空间探测器Astro-1对近紫外亮源的观测数据, 在NUV波段最亮的恒星的流量大约为 $10^{-13} \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \text{ nm})$ <sup>[40]</sup>. 因此, 夜间月球在紫外波段也是非常明显的亮源. 而对于月球辐射的计算, 目前已经有较为成熟的模型, 例如美国地质调查局开发的ROLO (Robotic Lunar Observatory)模型, 以及MT2009 (Miller-Turner 2009)辐射照度模型<sup>[41]</sup>.

利用月球测量紫外大气透过率, 仪器可以参照太阳辐射计, 只是需要选择高灵敏度的探测器. 例如Cimel公司生产的CE318-U和CE318-T型太阳-天空-月球光度计, 其中CE318-T已经应用到全球的AERONET (AErosol Robotic NETwork)站点进行气溶胶监测<sup>[42]</sup>, 并且Barreto等人<sup>[43]</sup>针对夜间光度计校准问题提出了更为简单且准确度与Langley法相当的校准方法. 此外,

由于月球的角直径与太阳相当, 包括跟踪设备在内, 可以较容易研制兼容昼夜测量的仪器. 不同之处在于, 月球存在月相变化. 由于月相每天都在变化, 月球在大气层顶处的辐射值每天也不同. 因此, 采用月球辐射计进行大气透过率测量存在一些限制, 需要在天气晴朗、大气稳定的有月夜晚按照Langley-plot定标法进行一次完整测量, 以获得当晚的大气整层透过率, 而且本次的定标结果并不适合其他的月相. 当次定标当次测量, 这对于在天文台址评估观测夜的大气透过率是完全可以的. 因为在天文可用夜, 天气本身就是晴朗的、稳定的, 如果有无月亮对大气透过率没有影响或影响很小, 那么在有月夜测量得到的结果也可以用来表征天文可用夜的紫外大气透过率. 同样对于天文观测等实际应用而言, 紫外大气透过率的测量只需在符合观测条件的天气下进行, 来作为选址的评价依据, 进行台址选择时不满足定标的天气条件的测量结果, 不作为台址评价的依据.

## 4 获取方法的特点与比较

### 4.1 软件模拟

通过软件按照大气辐射传输过程进行模拟计算, 所得结果是在由输入参数所确定的大气模型下的透过率, 因此, 为了获得可靠的计算结果, 提供准确的输入参数是关键. 通常有两种方式输入参数, 一种是直接采用软件内置的标准大气模型, 另一种, 是为了更加准确, 也可以采用自定义模型, 输入实时的参数, 包括分子密度廓线、气溶胶消光廓线等大气参数以及温度、气压等气象参数. 对于紫外波段的模拟计算, 与一般波段(可见光和红外波段)相比, 需要重点关注对紫外波段影响较大的输入参数, 如分子散射、大气层高度、臭氧及氧气分子浓度廓线、云光学厚度以及气溶胶光学厚度等参数.

上面介绍的几种模拟软件, 虽然可模拟的波长范围均包含了200 nm以上的紫外波段, 但不同的软件实际应用时也存在一些各自的特点.

6S模型目前主要用于无云条件下可见、近红外的模拟, 它单独处理吸收和散射的衰减, 因此在强吸收波段计算时准确性低, 如臭氧吸收强的紫外UV-C (200–280 nm)波段. 因此通过6S模型计算紫外大气透过率时, 只能模拟UV-B (280–315 nm)和UV-A

(315–400 nm)波段,且需要进行气溶胶和云的校正.

对于LOWTRAN和MODTRAN而言,二者都没有考虑非局部热力学平衡,因此理论上无法计算整层大气透过率,但MODTRAN作为LOWTRAN的改进模型,改进了部分算法模型,使得在计算紫外时更符合实际物理特征,计算精度更高<sup>[17]</sup>. 最新的版本的MODTRAN6对于紫外波段的模拟分辨率大大提高,同时开发了逐行(LBL)计算模式. 此外MODTRAN同时具有简明的网页版应用,能设置十余个参数,且分辨率很高,能初步计算最高100 km高度大气透过率,在200–400 nm波段分辨率可以达到0.48 nm.

SCIATRAN基于卫星遥感探测而开发,相较于MODTRAN模型,在天底模式尤其在临边模式下的模型更加准确且符合实际物理规律,在紫外波段有更高的分辨率,同时能设置更多细致的参数. SCIATRAN分辨率0.24–0.5 nm,在紫外波段只有波长大于240 nm才可以选择ESFT (相关K算法)模式和气溶胶选项,能较为方便地在紫外波段进行模拟计算,同时也经过了一定的验证,与实测对比有较好的模拟效果<sup>[30]</sup>.

FASCODE以及LBLRTM作为完全的逐线积分模型,平均透过率模拟精度完全依赖于给定的分子吸收谱参数以及线型函数,是其他大气辐射传输模型的验证标准,其准确性很大程度上依赖其使用的HITRAN数据库. 作为大气科学中使用最广泛的高分辨率分子数据库, HITRAN数据库是影响辐射传输准确性的主要因素. HITRAN数据库每四年更新一个版本,每一次更新包含了理论和实验光谱学的最新成果. 不同版本间的数据差异大小不同, HITRAN2k和HITRAN04在近红外的透光率差异可达35%, HITRAN04与HITRAN08之间辐射通量计算差别可达 $0.48 \text{ W m}^{-2}$ ,冷却率差异为 $0.05 \text{ K d}^{-1}$ ,因此在模拟计算时应根据需求选择数据库<sup>[44]</sup>.

LOWTRAN和MODTRAN也使用了HITRAN数据库中的分子光谱参数,但与FASCODE和LBLRTM不同,它们在计算大气分子吸收时采用的是带模式算法. 而另外两种不通过HITRAN数据库计算分子吸收的软件, 6S模型通过吸收线的随机指数分布统计模式计算分子吸收,计算精度略低于MODTRAN,但计算速度远快于MODTRAN<sup>[12]</sup>. 而SCIATRAN软件包含丰富的计算参数,考虑了重要的大气辐射传输过程,并对分子吸收内置了多种计算模式,能提供更加可靠的仿真

结果<sup>[29]</sup>. 但目前SCIATRAN较多应用于根据星载遥感数据反演大气成分,用于地基模拟获取大气透过率的研究较少.

总的来说,通过软件模拟计算大气透过率,成本低、计算便捷高效,理论上只需输入不同的参数就能模拟各种大气条件下的透过率,不过大气参数非常多,内置的大气模型有限,虽然可以选择自定义大气模型,但需要输入准确的大气参数和气象参数,如各种大气成分及其廓线数据、大气压力廓线和温度廓线等,对一般的使用者来说获取这些数据有一定的难度. 与仪器测量方法相比,软件模拟目前的一个显著优势是光谱分辨率高,尤其对于采用逐线积分法的模拟方法,能得到非常高的光谱分辨率的数据,其中LBLRTM经常作为评估快速辐射传输模型的标准,来确定其他模型的准确性. 但由于大气中气体分子吸收线分布密集,逐线积分法计算速度慢,难以满足实际应用的需求. LOWTRAN模型计算速度快,但是计算精度低,且计算高度存在上限,无法计算整层大气的透过率. 因此,实际应用中广泛采用计算速度折中的MODTRAN模型.

此外,由于实际大气复杂多变,而实时准确获取各种大气参数也存在一定难度,大多数使用者会采用软件内置的标准大气模型进行计算. 而目前大部分主流的模拟软件均由国外公司开发,如6S模型、LOWTRAN、MODTRAN和FASCODE均有6种大气模型可选: 热带(北纬15°)、中纬度夏季(北纬45°, 7月)、中纬度冬季(北纬45°, 1月)、亚北极区夏季(北纬60°, 7月)、亚北极区冬季(北纬60°, 1月)、1976或1962 (6S模型)年美国标准大气(北纬45°年均状态),其中前5种模型又是以第6种美国标准大气模型作为标准,在其基础上考虑了纬度、季节对标准大气模型大气性质的影响. 我国幅员辽阔,气候类型复杂多样,模拟软件内置的大气模型无法完全满足需求. 在实际计算时,国内的使用者如果有本地具体的大气参数和气象参数,可以通过选择自定义大气模型输入参数,以获得接近真实情况的计算结果. 若没有相关数据,只能以内置大气模型来计算,所得结果反映的是内置标准大气模型下的情况,是一种以标准大气模型为参数模拟得到的典型值或平均值,与实际情况可能会存在一定偏差. 而国内开发的CART系列模拟软件,可模拟的波段从可见到近红外,对紫外波段的模拟还有待开发.

## 4.2 仪器测量

大气整层透过率的仪器测量主要是利用太阳、月球、恒星辐射计或光谱仪作为测量设备, 通过直接测量实时的地面辐射值, 结合大气上界的对应辐射值计算得到整层透过率. 按照测量对象划分, 不同的测量仪器具有各自的特点. 采用太阳辐射计测量大气透过率, 测量对象为太阳, 光信号强, 对探测器灵敏度的要求不高, 光学结构简单, 不考虑仪器自身变化只需一次定标, 可测量得到昼间整层大气透过率. 而天文观测(除观测太阳)通常在夜间进行, 为了获得夜间大气透过率, 恒星辐射计是常用的测量仪器. 由于恒星光要比太阳光弱很多, 通常需要用望远镜收集星光, 对探测器灵敏度的要求较高. 为了测量紫外大气透过率, 测量中选择的恒星应为具有较强紫外辐射的早型星, 如O, B和A型星. 更为重要的是, 由于恒星的光谱与光谱型有关, 若测量中会更换不同的恒星作为测量对象, 则对同一类光谱型的恒星, 至少应选定一颗恒星进行一次定标, 才能对相同或相近光谱型的其他恒星进行观测, 从而得到大气透过率.

在测量紫外波段透过率时应注意, 一方面仪器光学部分涉及透射或反射的元件都需考虑对紫外辐射的传输效率, 如改用石英材料或在反射元件上镀铝和氟化镁, 另一方面在探测器上也需选用合适的紫外器件, 如紫敏硅光电二极管、背照式CCD等.

考虑到恒星光很弱和测量的复杂性, 月球辐射计也是夜间测量的一种选择. 在测量大气透过率的原理上, 月球辐射计与太阳、恒星辐射计相同, 只是在测量上只能当次定标当次测量. 这是由于月相每天都在变化, 即大气层顶处的月球辐射值每天都会不同, 并不存在一个恒定的大气外定标结果. 所以, 利用月球辐射计测量大气透过率, 应选择天气晴朗、大气稳定的夜晚, 按照Langley-plot定标法完成一次完整测量过程, 根据拟合得到的直线斜率就可以计算出当晚的垂直大气整层透过率.

不管如何选择测量对象, 大气整层透过率仪器测量的精度取决于测量的地面辐射值与采用的大气顶端辐射值的误差, 其中最主要的误差来源于仪器定标. Langley-plot定标法定标时, 对天气条件以及大气洁净度要求较高, 大气底层的湍流以及地表气溶胶密度的变化会使定标结果产生较大波动. 因此, Langley-plot

定标法一般综合多个时段的定标结果进行评定.

仪器测量的另一个误差来源与仪器的稳定性有关, 包括测试环境(主要是温度、湿度)对仪器测量结果的影响和仪器自身的长期变化. 光电仪器的响应度和温度通常存在一定相关性, 特别是在外场测量时, 温度的大范围变化以及和定标时温度的明显不同会影响测量结果的准确性和一致性. 因此, 如果温度变化范围过大, 野外测量时可以采取恒温控制来稳定温度, 或采集温度通过后期数据处理对测量值进行温度的补偿修正. 对于仪器自身的长期变化, 主要包括光学元件透过率、反射率的衰减和探测器响应度的变化(一般响应度会降低), 同时考虑仪器内电子电路的老化, 测量仪器应定期进行定标.

若采用光谱仪或窄带辐射计测量大气的光谱透过率, 带宽的选择也会影响测量结果的准确性. 光谱分辨率越高, 每个测量波段包含的范围越窄, 波段内辐射能量越低, 对探测器的灵敏度以及最低探测辐射量要求越高. 同时, 光谱分辨率越高, 由于光路或窄带滤光片透过率的缓慢变化导致的波长误差对测量结果的影响也越大. 因此, 实测时应根据需求选择合适的光谱分辨率, 在分子吸收弱的波段可以降低分辨率, 在分子吸收线密集的波段则适当加大分辨率.

## 5 结论

虽然空间探测是紫外天文学最合适的手段, 但地面紫外观测也有其存在的意义和作用. 一方面, 紫外观测在方法和技术上与光学观测很相似, 地面光学望远镜通常会将观测波段向近紫外延伸. 随着望远镜技术和探测器性能的提高, 更宽波段的望远镜和终端设备也为地面紫外观测提供了更多的可能. 另一方面, 相较于空间探测较高的费用和技术难度, 地面紫外观测是容易实施、更为可行的手段. 在一些具有紫外观测潜力的台站, 如南极或高海拔地区, 可尽量将望远镜的观测波段往短波延伸以开展紫外天文观测. 而地面紫外观测最重要的自然条件就是足够高的紫外大气透过率.

当前, 获取紫外波段大气透过率的主要方法是软件模拟和仪器测量. 软件模拟是利用6S模型、LOWTRAN、MODTRAN、FASCODE、LBLRTM和SCIA-TRAN等波长范围包括紫外波段的大气辐射传输计算

软件, 依据所处地域的气象特点和天气因素选择特定的模式进行模拟计算. 这些软件根据输入的大气气溶胶的组成、谱分布、总含量及温度、湿度等气象参数, 利用经过统计得到的经验公式和大气模型来反演当前大气的光学传输特性. 因此, 要获得可靠的计算结果, 关键是可以准确输入表征大气模型的各种大气参数和气象参数. 软件模拟的优点在于方便高效, 没有实际制造技术和工艺的限制, 在数据处理上具有优势, 能达到更高的光谱分辨率, 同时模拟成本也很低.

仪器测量则不需要预知大气参数和气象参数, 可实地开展测量, 获取观测地在测量时刻和测量条件下的整层大气透过率, 但目前光谱分辨率较低、能覆盖的波段要窄得多(常见的在可见光和近红外)、成本较高, 现场测量相对复杂. 按照测量对象的不同, 大气透过率的测量仪器可分为白天的太阳辐射计和夜间的恒星辐射计, 二者的测量原理相同, 都是通过直接测量来自测量对象的地面辐射值, 结合根据Langley-plot定标法得到的大气层顶处的辐射值, 从而计算得到大气整层透过率. 若是测量夜间的紫外大气透过率, 测量的恒星应选择具有较强紫外辐射的早型星, 如O、B和A型星, 并且对同一光谱型的恒星, 至少应选定一颗恒星进行一次定标, 才能对相同或相近光谱型的其他恒星进行观测. 另外, 根据月球在紫外波段的辐射强度, 夜间把月球作为测量对象也是一种选择. 只是由于月相每天都在变化, 月球在大气层顶处的辐射值每天也

不同. 因此月球辐射计需要在天气晴朗、大气稳定的夜晚按照Langley-plot定标法进行一次完整测量, 以获得当晚的大气整层透过率.

总的来说, 目前的大气透过率获取方法是成熟的, 软件模拟和仪器测量可在不同的要求和条件下独立使用. 很多时候, 仪器测量还可以与软件模拟一起使用, 相互比较和验证. 此外, 软件模拟对于实际难以测量的条件下的传输过程有较好的补充, 如临边条件以及恶劣天气条件等. 尽管如此, 这些方法在实际应用中较多地是在一般波段(可见光和红外)使用, 但应用到紫外波段仍有一些需要注意的地方. 软件模拟对于紫外波段计算的实验验证和改进还不够多, 仪器测量法中大多数仪器的工作波段是光学和近红外, 紫外波段的适用仪器较少. 所以, 对于紫外大气整层透过率的测量研究还有几个方面值得深入.

(1) 完善国内的大气和气象资料, 建立更适合我国的标准大气模型, 由此可更准确地根据大气模型调整软件模拟的输入参数或者在国内开发的软件中直接内置为标准大气模型.

(2) 对模拟软件紫外波段的透过率模拟进行实验验证, 确定模拟误差大小, 改进紫外波段计算模型和算法.

(3) 对于实验仪器, 通过改进光学结构和探测器将工作波段扩展至近紫外, 达到大气“紫外窗口”的短波段, 如300 nm甚至更短.

## 参考文献

- 1 Zhao J L. Multiwavelength astronomy (in Chinese). *Chin J Nature*, 2007, 29: 193–199, 249–250 [赵君亮. 多波段天文学. 自然杂志, 2007, 29: 193–199, 249–250]
- 2 Luo H J, Luo G, Cui Z, et al. The engineering calculation of moderate resolution long range atmospheric transmission in mid-wave infrared waveband (in Chinese). *Opt Tech*, 2021, 47: 728–732 [罗华钧, 罗刚, 崔植, 等. 中等分辨力的远距离中波红外大气透过率工程计算方法. 光学技术, 2021, 47: 728–732]
- 3 Li J Y, Zeng D G. Discussion of Rayleigh scattering formula (in Chinese). *Univ Chem*, 1992, 7: 57, 58–60 [李锦瑜, 曾道刚. 瑞利散射公式讨论. 大学化学, 1992, 7: 57, 58–60]
- 4 Chen Q H, Liu J H, Luo H F, et al. Correction to the calculation equations of moist air refractive index at the wavelength of 633 nm (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2014, 41: 163–167 [陈强华, 刘景海, 罗会甫, 等. 对633 nm波长下湿空气折射率计算公式的精确修正. 中国激光, 2014, 41: 163–167]
- 5 He Z W. Research on the Ultraviolet Spectral Radiation Characteristic of Atmospheric Background (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013 [何曾文. 大气背景紫外光谱辐射特性研究. 硕士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2013]
- 6 Zhang H, Shi G Y, Liu Y. The effects of line-wing cutoff on radiative calculations (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2007, 65: 968–975 [张华, 石广玉, 刘毅. 线翼截断方式对大气辐射计算的影响. 气象学报, 2007, 65: 968–975]

- 7 Zhang R, Shang Z, Lu S, et al. Spectral partition correlation based on Voigt function for Raman spectral library search. *Chemomet Intell Lab Syst*, 2021, 215: 104353
- 8 Quine B M, Abrarov S M. Application of the spectrally integrated Voigt function to line-by-line radiative transfer modelling. *J Quant Spectr Radiative Transfer*, 2013, 127: 37–48
- 9 Yang P, van der Tol C, Yin T, et al. The SPART model: A soil-plant-atmosphere radiative transfer model for satellite measurements in the solar spectrum. *Remote Sens Environ*, 2020, 247: 111870
- 10 Tanré D, Deroo C, Duhaut P, et al. Technical note description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: the 5S code. *Int J Remote Sens*, 1990, 11: 659–668
- 11 Tanré D, Deuze J L, Herman M, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1997, 35: 675–686
- 12 Jiao B L, Gao Z Q, Li S J, et al. Atmospheric radiative transfer model and its software (in Chinese). In: *Proceedings of the 18th National Conference on Computer Technology and Applications (CACIS)*. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2007 [焦斌亮, 高志强, 李素静, 等. 大气辐射传输模型及其软件. 见: 全国第18届计算机技术与应用(CACIS)学术会议论文集. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2007]
- 13 Huang Y F, Jin Y. Brief introduction of LOWTRAN 6 (in Chinese). *Meteorol Mon*, 1991, 17: 55–57 [黄意玢, 金燕. LOWTRAN 6简介. 气象, 1991, 17: 55–57]
- 14 Ren K, Tian J, Gu G, et al. Operating distance calculation of ground-based and air-based infrared system based on Lowtran7. *Infrared Phys Tech*, 2016, 77: 414–420
- 15 Berk A. Voigt equivalent widths and spectral-bin single-line transmittances: Exact expansions and the MODTRAN®5 implementation. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2013, 118: 102–120
- 16 Berk A, Hawes F. Validation of MODTRAN®6 and its line-by-line algorithm. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2017, 203: 542–556
- 17 Gong J, Lan T, Liu J, et al. Simulated calculation on atmospheric UV transmission with LOWTRAN and MODTRAN model (in Chinese). In: *Proceedings of the Opto-electronic Technology and System Selection*. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005 [龚俊, 蓝天, 刘杰, 等. LOWTRAN与MODTRAN模型关于大气紫外传输的模拟计算. 见: 光电技术与系统文选. 北京: 电子工业出版社, 2005]
- 18 Zhu M, Zhang F, Li W, et al. The impact of various HITRAN molecular spectroscopic databases on infrared radiative transfer simulation. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2019, 234: 55–63
- 19 Karlovets E V, Gordon I E, Hashemi R, et al. Addition of the line list for carbon disulfide to the HITRAN database: Line positions, intensities, and half-widths of the 12C32S2, 32S12C34S, 32S12C33S, and 13C32S2 isotopologues. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2021, 258: 107275
- 20 Zhou F X, Wang L Y. FASCODE, the microcomputer software package for fast and accurate calculation of atmospheric transmittance (in Chinese). *J Infrared Millimeter Wave*, 1991, 10: 398–400 [周凤仙, 王路易. 快速精确计算大气透过率的微机软件包——FASCODE. 红外与毫米波学报, 1991, 10: 398–400]
- 21 Wei H L, Dai C M. Research of atmospheric transfer correction in radiance measurement: atmospheric radiative transfer model and the analysis of key atmospheric parameters (in Chinese). *Infrared Laser Eng*, 2014, 43: 884–890 [魏合理, 戴聪明. 辐射特性测量大气传输修正研究: 大气辐射传输模式和关键大气参数分析. 红外与激光工程, 2014, 43: 884–890]
- 22 Sun Y Y, Dong H, Bi C H, et al. Inter comparison of models for radiative transfer in the atmosphere (in Chinese). *High Power Laser Particle Beams*, 2004, 16: 149–153 [孙毅义, 董浩, 毕朝辉, 等. 大气辐射传输模型的比较研究. 强激光与粒子束, 2004, 16: 149–153]
- 23 Clough S A, Shephard M W, Mlawer E J, et al. Atmospheric radiative transfer modeling: A summary of the AER codes. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2005, 91: 233–244
- 24 Clough S A, Iacono M J, Moncet J L. Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates: Application to water vapor. *J Geophys Res*, 1992, 97: 15761–15785
- 25 Sun B, Ding S. Application and evaluation of the small-angle approximation on forward radiative transfer model. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2020, 246: 106937
- 26 Saeed A, Gurbuz O, Akkas M A. Terahertz communications at various atmospheric altitudes. *Phys Commun*, 2020, 41: 101113
- 27 Rozanov A, Rozanov V, Buchwitz M, et al. SCIATRAN 2.0—A new radiative transfer model for geophysical applications in the 175–2400 nm spectral region. *Adv Space Res*, 2005, 36: 1015–1019
- 28 Li Y, Zhang C, Liu D, et al. Comparison between the ESFT and LBL simulation with enhanced SCIATRAN of orbital CO<sub>2</sub> retrieval for High-

- resolution Satellite. *Optik*, 2015, 127: 628–633
- 29 Rozanov V V, Dinter T, Rozanov A V, et al. Radiative transfer modeling through terrestrial atmosphere and ocean accounting for inelastic processes: Software package SCIATRAN. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2017, 194: 65–85
- 30 Zhao Y. Spatio-Temporal Variation of Earth Surface UV-B Irradiance and Sensitivity Analysis (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Jilin: Jilin University, 2014 [赵莹. 地表UV-B辐照度时空变化及其敏感性分析. 硕士学位论文. 吉林: 吉林大学, 2014]
- 31 Kato S, Ackerman T P, Mather J H, et al. The k-distribution method and correlated-k approximation for a shortwave radiative transfer model. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 1999, 62: 109–121
- 32 Rozanov A V, Rozanov V V, Burrows J P. Modeling of inelastically scattered radiation: rotational Raman scattering in the spherical Earth's atmosphere. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2021, 268: 107611
- 33 Sateesh M, Soni V K, Raju P V S, et al. Cluster analysis of aerosol properties retrieved from a sky-radiometer over a coastal site: Thiruvananthapuram, India. *Atmos Pollution Res*, 2018, 9: 207–219
- 34 Mou F S, Li A, Xie P H, et al. Retrieval of aerosol optical properties at Hefei by sun-photometer CE318 data (in Chinese). *Infrared Laser Eng*, 2016, 45: 168–173 [牟福生, 李昂, 谢品华, 等. 利用CE318太阳光度计资料反演合肥气溶胶光学特性. *红外与激光工程*, 2016, 45: 168–173]
- 35 Huang Y, Wang S R, Song K F, et al. Design of solar ultraviolet spectral radiometer and out-field experiments in Lijiang (in Chinese). *Infrared Laser Eng*, 2008, 37: 530–533 [黄煜, 王淑荣, 宋克非, 等. 太阳紫外光谱辐射计的研制及丽江外场实验. *红外与激光工程*, 2008, 37: 530–533]
- 36 Zhan J, Guo R P, Huang H H, et al. Development of whole layer atmospheric transmittance day and night measuring instrument (in Chinese). In: *Proceedings of the Yangtze River Delta Photon Technology Innovation Forum and 2006 Anhui Doctor Technology Forum*. Hefei: Anhui Renmin Press, 2006 [詹杰, 郭瑞鹏, 黄宏华, 等. 整层大气透过率昼夜测量仪研制. 见: 长三角光子科技创新论坛暨2006年安徽博士科技论坛论文集. 合肥: 安徽人民出版社, 2006]
- 37 Xu Q S, Zhan J, Li W, et al. Stellar extinction measurement of whole atmosphere transmittance (in Chinese). In: *Proceedings of the Integrated Meteorological Sounding Technology, 2007 Annual Meeting of Chinese Meteorological Society*. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2007 [徐青山, 詹杰, 李威, 等. 整层大气透过率恒星消光测量. 见: 中国气象学会2007年年会气象综合探测技术分会论坛论文集. 北京: 中国气象学会, 2007]
- 38 Bianchi L, Conti A, Shiao B. The Ultraviolet Sky: An overview from the GALEX Surveys. *Adv Space Res*, 2013, 53: 900–912
- 39 Snow M, Holsclaw G M, McClintock W E, et al. Absolute ultraviolet irradiance of the Moon from the LASP Lunar albedo measurement and analysis from SOLSTICE (LLAMAS) Project. *ISSI Scientific Report Series*. New York: Springer, 2013. 13: 227–253
- 40 Smith E P, Pica A J, Bohlin R C, et al. Ultraviolet imaging telescope near-ultraviolet bright object catalog. *Astrophys J Suppl Ser*, 1996, 104: 287
- 41 Zhang L, Zhang P, Hu X Q, et al. Comparison of lunar irradiance models and validation of lunar observation on Earth (in Chinese). *J Remote Sens*, 2017, 21: 864–870 [张璐, 张鹏, 胡秀清, 等. 月球辐射照度模型比对及地基对月观测验证. *遥感学报*, 2017, 21: 864–870]
- 42 Perrone M R, Lorusso A, Romano S. Diurnal and nocturnal aerosol properties by AERONET sun-sky-lunar photometer measurements along four years. *Atmos Res*, 2022, 265: 105889
- 43 Barreto Á, Cuevas E, Granados-Muñoz M J, et al. The new sun-sky-lunar Cimel CE318-T multiband photometer—a comprehensive performance evaluation. *Atmos Meas Tech*, 2016, 9: 631–654
- 44 Dai C M, Wei H L, Hu S X. Analysis on upper atmospheric radance transfer characteristic to different HITRAN databases (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2013, 33: 9–16 [戴聪明, 魏合理, 胡顺星. 不同版本HITRAN数据库对高层大气辐射传输影响特性分析. *光学学报*, 2013, 33: 9–16]

# Acquisition methods for ultraviolet atmospheric transmittance at astronomical sites

ZENG Yang<sup>1</sup>, LU LiGen<sup>1,2\*</sup> & ZHANG BaoZhou<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*

<sup>2</sup> *Beijing Key Laboratory for Applied Optics, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*

Ultraviolet atmospheric transmittance is a key parameter in reflecting the optical characteristics of the atmosphere in the ultraviolet region. It is practically significant in providing the basis for ground-based ultraviolet observation, especially in site surveys, telescope construction, and terminal equipment development. In this paper, common methods for obtaining ultraviolet atmospheric transmittance are introduced, including computational simulation and instrumental measurement, and their properties are compared and analyzed. Moreover, a new method, using the moon as a measuring object is proposed to acquire the ultraviolet atmospheric transmittance at night, and some suggestions are put forward.

**atmosphere transmittance, ultraviolet band, software simulation, solar radiometer, stellar radiometer**

**PACS:** 42.68.Ay, 95.85.Ls, 92.60.Aa, 95.55.Ev, 95.55.Qf

**doi:** [10.1360/SSPMA-2022-0061](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2022-0061)