

分类号	
学校代码	10700
学号	2200220124

西安理工大学

# 硕士学位论文

(学术学位)

不同辐射传输模式对大气散射辐射亮度的对比校正与应用

秦一丁

学科门类: 工 学

一级学科: 仪器科学与技术

二级学科: \_\_\_\_\_

指导教师: 王玉峰 教授

申请日期: 2023年6月

论文题目：不同辐射传输模式对大气散射辐射亮度的对比校正与应用

学科名称：仪器科学与技术

研究生：秦一丁

签名：\_\_\_\_\_

指导教师：王玉峰 教授

签名：\_\_\_\_\_

## 摘 要

大气散射辐射亮度作为大气光学特性中的一个重要参量，在大气成分探测、空间目标识别和航空安全等领域具有重要科学研究意义和工程应用价值。目前，利用辐射传输模式可精确、快速地模拟得到大气散射辐射亮度的结果。但是，基于不同的几何近似模型发展形成的辐射传输模式对于大气散射辐射亮度的模拟结果存在差异性，尤其是在白天斜程能见度精确测量中，大气散射辐射亮度将直接影响斜程能见度的测量结果。本文以大气散射辐射亮度为研究对象，以平行平面大气模型 SBDART 辐射传输模式和伪球形大气模型 libRadtran 辐射传输模式为手段，开展不同辐射传输模式的大气散射辐射亮度模拟对比和相互校正研究，并将校正后的大气散射辐射亮度结果应用到斜程能见度测量中。具体工作如下：

首先，论文基于辐射传输方程及其求解理论，开展了 SBDART 模式和 libRadtran 模式对大气散射辐射亮度的模拟。完成了太阳光谱、标准大气模型、气溶胶模型等模式内置参数和输入选项的统一设置；通过气溶胶光学参数和云层参量的设置，分别利用两个模式对晴天和云层天气条件下的大气散射辐射亮度进行了模拟，以 libRadtran 模式模拟结果作为真值，重点对比了不同高度层大气散射辐射亮度分布、不同方向的大气散射辐射亮度以及到达地面的太阳直接和散射辐射亮度的输出结果。对比和分析结果表明：在较大的观测天顶角方向上，由 SBDART 模式模拟的大气散射辐射亮度明显高于 libRadtran 模式的结果，反映了在较大的观测天顶角方向上对 SBDART 模式计算结果进行校正的必要性。

进而，论文开展了大气散射辐射亮度的校正方法研究。基于平行平面和伪球形辐射传输方程的差异性，提出了基于 libRadtran 的伪球形大气校正方法，引入查普曼校正函数，结合大气气溶胶消光系数和大气透过率，对大气校正系数和大气校正过程进行了仿真模拟。在此基础上，在不同天气条件下，在较大的观测天顶角方向上，利用查普曼函数对 SBDART 模式模拟的大气散射辐射亮度进行校正仿真。校正仿真结果表明，在大天顶角度观测方向上，校正后的 SBDART 模式模拟辐射亮度与 libRadtran 模式模拟的结果

相吻合，晴天条件下地面处偏差由校正前的  $24.5 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$  减小为  $13.7 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$  左右，云层天气下云层高度处偏差由校正前的  $21 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$  减小为  $9.5 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$  左右，验证了伪球形校正方法的正确性和有效性。

最后，在校正方法仿真实现的基础上，利用西安理工大学激光雷达遥感中心的一套斜程能见度激光雷达系统开展实际大气条件下大气散射辐射亮度的校正，并将校正结果应用到斜程能见度的测量中。结果表明：在晴天条件下，大气散射辐射亮度校正前后计算的斜程能见度分别为  $9.88 \text{ km}$  和  $11.49 \text{ km}$ ；在云层天气条件下，大气散射辐射亮度校正前后计算的斜程能见度分别为  $4.17 \text{ km}$  和  $5.03 \text{ km}$ 。利用伪球形校正后的大气散射辐射亮度能够提高斜程能见距，在一定程度上减小了由平行平面大气辐射传输模型引起的误差。

**关键词：**大气散射辐射亮度；激光雷达；SBDART；libRadtran；斜程能见度

\*本研究工作得到了国家自然科学基金民航联合基金重点项目（编号：No. U1733202）的资助。

**Title: COMPARISON, CORRECTION AND APPLICATION OF DIFFERENT RADIATIVE TRANSFER MODELS ON ATMOSPHERIC SCATTERED RADIANCE**

**Major: Instruments Science and Technology**

**Name: Yiding Qin**

**Signature: \_\_\_\_\_**

**Supervisor: Prof. Yufeng WANG**

**Signature: \_\_\_\_\_**

**Abstract**

As an important parameter of atmospheric optical properties, atmospheric scattered radiance has important scientific research significance and engineering application value in the fields of atmospheric composition detection, space target recognition and aviation safety. At present, the results of atmospheric scattered radiance can be simulated accurately and quickly by using the radiative transfer model. However, there are differences in the simulation results of atmospheric scattered radiance by different geometric approximation models. Especially, in the accurate measurement of daytime slant visibility, the atmospheric scattered radiance will directly affect the measurement results of slant visibility. In this paper, the atmospheric scattered radiance is taken as the research object, and the SBDART radiative transfer model of the parallel plane atmospheric model and the libRadtran radiative transfer model of the pseudo-spherical atmospheric model are used as the means to carry out for the comparisons of the atmospheric scattered radiance and mutual correction from different radiative transfer models. The corrected atmospheric scattered radiance results are further applied to the measurements of the slant visibility. The specific work is as follows:

Firstly, based on the radiative transfer equation and its solution theory, the simulation of atmospheric scattered radiance by SBDART model and libRadtran model is carried out. The built-in parameters and input options of solar spectrum, standard atmosphere model and aerosol model are unified. Through the setting of aerosol optical parameters and cloud parameters, the atmospheric scattered radiance under sunny and cloudy weather conditions was simulated by two models. The distribution of atmospheric scattered radiance at different layers, the atmospheric scattered radiance at different directions, and the output results of the solar direct and diffuse irradiance reaching the ground were compared respectively. The comparison and analysis results show that, the simulated atmospheric scattered radiance by SBDART model is

higher than that by libRadtran model in the direction of large observation zenith angles, which reflects the necessity of the correction of SBDART model in the direction of large observation zenith angles.

Furthermore, the correction method of atmospheric scattered radiance is carried out. Based on the difference between the parallel plane and the pseudo-spherical radiative transfer equation, a pseudo-spherical atmospheric correction method based on libRadtran is proposed. The Chapman correction function is introduced, and the atmospheric correction coefficient  $C$  and atmospheric correction process are simulated by combining the atmospheric aerosol extinction coefficient and atmospheric transmittance. On this basis, under different weather conditions, the Chapman function is used to correct the atmospheric scattered radiance simulated by the SBDART model in the direction of larger observation zenith angle. The simulation results show that, in the direction of large zenith angle, the corrected radiance of the SBDART model is consistent with that of the libRadtran model. After correction, the deviation is reduced from  $24.5 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$  to about  $13.7 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$  under clear conditions, and reduced from  $21 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$  to about  $9.5 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$  at cloud height, which verifies the correctness and effectiveness of the pseudo-spherical correction method.

Finally, based on the simulation of the correction method and the established slant visibility lidar system in Xi'an University of Technology Laser Radar Remote Sensing Center, the atmospheric scattered radiance under actual atmospheric conditions is corrected and applied to the measurement of slant visibility. The results show that, under clear condition, the slant visibility is 9.88 km and 11.49 km before and after the correction of atmospheric scattered radiance; under cloudy weather condition, the slant visibility by scattered radiance correction is extended from 4.17 km to 5.03 km. Thus, the measurement distance of slant visibility can be improved by the pseudo-spherical correction method, and the error caused by the parallel plane atmospheric radiative transfer model can be reduced to a certain extent.

**Key words:** Scattered Radiance; Lidar; SBDART; libRadtran; Slant Visibility

\*This work is supported by the the National Natural Science Foundation of China Civil Aviation Joint Fund Key Project (Grant No. U1733202).

# 目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 大气散射辐射亮度的研究现状.....	2
1.2.2 辐射传输算法和辐射传输模式研究现状 .....	3
1.3 主要研究内容.....	5
2 辐射传输方程及辐射传输模式 .....	7
2.1 辐射传输方程理论.....	7
2.2 辐射传输方程的求解.....	9
2.3 辐射传输模式.....	11
2.3.1 SBDART 辐射传输模式 .....	11
2.3.2 libRadtran 辐射传输模式.....	13
2.4 本章小结.....	16
3 SBDART 模式和 libRadtran 模式对大气散射辐射亮度模拟与对比	17
3.1 引言.....	17
3.2 SBDART 模式和 libRadtran 模式输入参数设置.....	17
3.2.1 太阳光谱参数设置.....	17
3.2.2 标准大气模型的设置.....	18
3.2.3 气溶胶类型的设置.....	20
3.2.4 地表反照率模型的设置.....	20
3.2.5 云层分布参数的设置.....	21
3.3 SBDART 和 libRadtran 模式对大气散射辐射亮度的模拟与对比 .....	22
3.3.1 晴空天气条件下大气散射辐射亮度的对比 .....	22
3.3.2 云层天气条件下大气散射辐射亮度的对比 .....	27
3.4 本章小结.....	32
4 大气散射辐射亮度校正方法的仿真与分析 .....	33
4.1 引言.....	33
4.2 基于 libRadtran 的伪球形校正方法.....	33
4.3 查普曼函数校正的仿真与实现 .....	35
4.3.1 不同方向上的查普曼函数校正仿真.....	35
4.3.2 不同气溶胶消光系数的查普曼函数校正仿真 .....	36
4.4 利用伪球形校正方法对 SBDART 模式大气散射辐射亮度的校正 .....	38

4.4.1 晴空天气条件下大气散射辐射亮度的校正的仿真与分析 ..38	
4.4.2 云层天气条件下大气散射辐射亮度的校正的仿真与分析 ..40	
4.5 本章小结.....43	
5 基于激光雷达和辐射传输模式的斜程能见度的实验与验证 .....45	
5.1 斜程能见度激光雷达系统介绍 .....45	
5.2 斜程路径上大气散射辐射亮度的校正与实现 .....46	
5.2.1 晴空条件下大气散射辐射亮度的校正 .....46	
5.2.2 云层条件下大气散射辐射亮度的校正 .....49	
5.3 大气散射辐射亮度校正的斜程能见度测量 .....51	
5.3.1 斜程能见度测量原理.....51	
5.3.2 大气散射辐射亮度校正前后斜程能见度比较 .....52	
5.4 本章小结.....54	
6 总结与展望.....55	
6.1 总结.....55	
6.2 展望.....56	
参考文献.....57	

# 1 绪论

## 1.1 研究背景及意义

大气散射辐射亮度是指当太阳辐射穿过大气层时,与大气中气体分子、气溶胶等物质发生散射和吸收作用,这些作用共同形成了大气散射辐射亮度<sup>[1]</sup>。大气散射辐射亮度的强度会随着太阳辐照强度、大气气压、温度、大气分子和气溶胶等因素的不同而发生变化。大气散射辐射亮度也被称为天空背景辐射亮度,它作为大气光学特性中的一个重要参量,是高空目标探测和成像、目标跟踪与成像、大气气溶胶光学特性反演和地球大气成分探测等领域的重要研究内容,在多个领域得到了广泛应用<sup>[2-4]</sup>。

能见度是反映大气透明程度重要指标之一,它反映了在观测方向上被测物体可辨别的远近程度,被视为了解大气稳定性和垂直结构的重要参数,在气象分析、航空运输、天文观测和海雾预警等领域起着关键性作用<sup>[5-7]</sup>。在航空领域尤其是民航运输中,能见度能够帮助机组人员识别和避免潜在的种种危险,以确保民航和飞行器的安全运行。其中,斜程能见度的准确测报能够为地面塔台和机组人员提供关键的飞行安全信息以确保飞机的安全起降<sup>[8]</sup>。在白天的斜程能见度测量中视线路径上大气散射辐射亮度对目标物和背景亮度有着重要影响,因此,白天的斜程能见度测量与大气散射辐射亮度密切相关。

目前,获取大气散射辐射亮度的方法主要有两种:一种是利用天空成像仪等相关仪器测量天空背景辐射亮度;另一种是基于现有的辐射传输模式求解辐射传输方程对大气散射辐射亮度进行模拟。随着计算机技术的发展,已发展形成了多种大气辐射传输模式,他们基于不同的算法基础,在不同的应用场景和领域得到广泛应用。因此,利用辐射传输模式是实现大气散射辐射亮度模拟的常用方法,但是,不同的辐射传输模式,由于采用了不同的几何近似模型,同时对于气溶胶和云的参数配置方面也存在差异,因此,不同的辐射传输模式对大气辐亮度模拟的结果会存在一定差异性。

一般认为,大气几何模型的选用影响着辐射传输方程的求解的速度和精度。主流的辐射传输模式使用的大气几何模型有平行平面大气模型,伪球形大气模型和球形大气模型,具有代表性的辐射传输模式有 SBDART 辐射传输模式和 libRadtran 辐射传输模式。一方面,与其他辐射传输模式相比, SBDART 模式不仅拥有用户友好性和可视化界面,还具有高计算精度、灵活性和可扩展性等优势,因此,在目前课题组开展的斜程能见度精确测量技术中,采用激光雷达结合 SBDART 模式的斜程能见度反演方法,其中利用了平行平面 SBDART 大气辐射传输模式进行对大气散射辐射亮度的模拟<sup>[9]</sup>。但是,在实际应用中,针对于大观测天顶角方向上的斜程能见度测量,发现基于平行平面几何模型的 SBDART 模式存在过量评估了该方向上的光学厚度分布,使得斜程路径上的大气散射辐射亮度产生一定的偏差,从而影响大天顶角方向上的斜程能见度测量,一定程度上反映了 SBDART 模式在大天顶角方向辐亮度模拟方面的缺陷。另一方面, libRadtran 辐射传



输模式采用了球形或伪球形几何近似，具有丰富的数据库和高的数据自由度，理论上可获得任意天顶角方向上的辐亮度模拟，但是，该模式无法实现批量化数据处理，同时存在对云参数设置不够精细等问题，因此在实际应用于中对辐亮度的模拟也存在一定的局限性<sup>[10]</sup>。

因此，本文以大气散射辐射亮度为研究对象，以平行平面大气模型 SBDART 辐射传输模式和伪球形大气模型 libRadtran 辐射传输模式为手段，探讨不同辐射传输模式对大气散射辐射亮度的模拟和对比，并开展相应的校正方法研究，以期应用到斜程能见度的实际测量中，为大气散射辐射亮度的准确模拟以及斜程能见度的精确测量提供技术支持和数据保障，在航空航运安全领域中具有重要的工程应用价值。

## 1.2 国内外研究现状

目前对大气散射辐射亮度的研究主要有两种方法，即使用天空成像仪等测量设备和采用辐射传输模式模拟。下面主要从这两方面入手介绍大气散射辐射亮度的研究现状。

### 1.2.1 大气散射辐射亮度的研究现状

利用天空成像仪、非成像扫描型光谱仪等仪器可测量得到大气散射辐射亮度或天空背景辐射亮度的观测，根据探测原理，可分为成像固定型和非成像扫描型两种<sup>[11]</sup>。

成像固定型主要指全天空成像型的天空背景亮度探测仪器，它使用特定的相机对目标天空进行拍摄，以获取全天空的图像数据，并通过分析图像中的信息，得到天空背景辐射亮度的分布。如美国 YES 公司研制的商业性 880 型半球天空成像仪 (TSI)，该装置将一个带有鱼镜头的 CCD 相机安装在其顶部，并使其竖直朝下对准半球面反射镜，获得天空背景辐射亮度的信息<sup>[12]</sup>，同时根据识别出的云的分布来提高亮度信息的准确性。加利福尼亚大学的 MPL 实验室研制的全天空成像仪 (WSI)，该仪器采用一台高分辨率数字相机和一个特制鱼镜头，通过图像数据结合软件程序进行处理和分析，获取不同波长范围内的天空背景辐射分布图像<sup>[13]</sup>。U.Feister 和 J.Shields 等人基于 WSI 开发了日光 VIS/NIR 全天空成像仪，有效地监测云量和天气变化等信息，并可在不同时间段内提供不同性质的天空背景亮度数据<sup>[14]</sup>。ASI 全称为地面全天空成像仪 (All Sky Imager)，采用的是高分辨率、全彩色的 CCD 相机，辅以鱼眼透镜，使其能够获取到视张角达到 185 度的全天空图像<sup>[15]</sup>。UCB 和 UoFC 联合负责地面天文台 (GBO) 利用 20 台 ASI(地面全天空成像仪)阵列和一个地面磁力计 (GMAG) 组成的 THEMIS 来观察极光，以确定发生亚风暴的地点和时间，具有很高的时间分辨率。

在国内的科研机构也在开展了这方面的技术研发和产品研究。大气所研发了一款自主地基观测系统，通过多种手段联合观测，能够实现全天空可见光成像、天气预报和为大气环境监测提供准确数据<sup>[16]</sup>。霍娟等人使用采用配有鱼镜头的日本 NikonCOOLPIX990 数码相机拍摄天空，以获取全天空背景图像，这类仪器可测量和采集天空背景辐射亮度<sup>[17]</sup>。苏源等人使用中国科学院大气物理研究所和航天新气象公司合作

研发的可见光/红外全天空红外扫描成像系统,采集全天空立体图像并结合云雷达得到可见光和红外光亮温,经过辐射标定修正等处理最后反演得到云底高度以及云量信息<sup>[18]</sup>。一般认为,利用成像仪器获取背景辐射的强度和光谱信息,虽然这种方法可以快速精确地获取天空背景辐射的亮度值,但需要仪器具备高灵敏度、高分辨率和准确的校准等条件<sup>[19,20]</sup>。

第二种非成像扫描型观测设备。通过光源接收装置,对天空不同方位进行探测,获取与空间方位相关的辐射亮度数据,进而得到天空背景辐射亮度或大气散射辐射亮度。

法国 CIMEL 公司研制的 CE318 辐射计是一种自动跟踪扫描型太阳辐射计,具有 8-10 个通道,测量波段覆盖可见光和近红外波段,它能测量太阳直射辐射,并通过卫星进行远程传输,同时还能扫描地球大气层<sup>[21]</sup>。日本 Pandithural.G 等人开发的 POM-01 等系列的太阳光度计是一种直接检测地面位置太阳直接辐射和天空背景辐射亮度的仪器,该仪器提供高精度的角度和光谱扫描,可定期测量预定义散射角下的直接和散射天空辐射亮度<sup>[22]</sup>。Legg.T 设计的通风式太阳辐射强度计 (CM21) 用于测量下行短波辐射通<sup>[23]</sup>。

在国内非成像型扫描观测设备发展中,国防科技大学刘伟峰等人设计的天空背景辐射测量系统 TKFS01,通过使用光纤将光信号传输到由单色仪和面阵 CCD 组成的光学系统中,并通过转台实现对半球空域的扫描测量,从而实现天空背景光谱数据的不间断采集<sup>[24]</sup>。中科院研究生院李威等人开发了一种结构简单、携带方便的用于白天的天空辐射亮度地测量仪器<sup>[25]</sup>。该探测器可探测的波谱区域扩大至可见光到近红外波段间,更加贴合太阳光能量分布的实际范围,同时也符合大气光学研究的实际波段,并且可在小于 0.4 秒的时间内获得天空亮度分布,有利于研究天空亮度瞬时变化,可监测单一方向或多个方向的天空亮度。詹杰在此基础上进行了改进,实现了多个方位的天空背景辐射亮度分布的采样。徐文清在前人的基础上,研制了实时测量天空背景辐射亮度的设备 DTL-1,能够实现全天空扫描,并在指定方向上完成 400-1000 nm 波段上积分辐射亮度的测量,并满足测量的可靠性和测量要求<sup>[26]</sup>。

### 1.2.2 辐射传输算法和辐射传输模式研究现状

通过求解辐射传输方程可以模拟天空背景辐射的亮度分布和光谱特性,获取天空背景辐射的亮度值,由于其求解复杂,一般只能通过核心程序和辐射传输模式软件获得近似解。从 1960 年开始,国外的科学家们逐渐提出了辐射传输算法,比较典型的算法主要有二流近似法 (twostr)、离散坐标法 (DISORT)、有限体积法 (FVM) 和蒙特卡洛法 (Monte Carlo) 等。1960 年,Chandrasekhar 提出了一维大气辐射传输方程的具体表达式<sup>[27]</sup>。1979 年,W.E.Meador 和 W.R.Weaver<sup>[28]</sup>提出二流近似法求解球形大气模型下的辐射传输方程,后续发展形成的平行平面大气模型也是在二流近似的基础上逐渐形成的<sup>[29]</sup>。1994 年,J.C.Chai 等人使用有限体积法求解辐射传输方程<sup>[30]</sup>。Furmanski.P 等人基于有限元空间离散化和迭代技术提出了一种计算参与介质中温度、传导和辐射热通量分布的方法<sup>[31]</sup>。2005 年,哈尔滨工业大学齐宏等人在离散坐标法和有限元理论的基础上提出了一

种用于模拟吸收、发射和各向异性散射介质中辐射传热的有限元方法<sup>[32]</sup>。2018年，M.A.Badri 等人使用矢量有限元结合离散坐标法求解辐射传输方程的空间-角度离散化问题<sup>[33]</sup>。1998年，自 Stamnes<sup>[34]</sup>等人提出离散坐标法（DISORT）求解求解方程组以来，国内外的科研工作者相继开展了这方面的研究工作。1988年，W.A.Fiveland 将 DISORT 拓展应用到三维热辐射求解中<sup>[35]</sup>。1998年，南京大学胡丽琴等人利用 DISORT 和矩阵算法，对比计算了太阳辐射在大气气溶胶介质内部的辐射以及在卷云和水云中的多次散射过程<sup>[36]</sup>。2006年兰州大学李英华等人在 DISORT 的框架基础上，开发了适合兰州地区的气溶胶辐射传输算法，并与 LOWTRAN7 模式运算结果进行了对比<sup>[37]</sup>。2014年，中国科学院张春文等人在 DISORT 算法的基础上引入了统计分析方法确定冰雪的发射率<sup>[38]</sup>。2016年，长安大学马菁基于离散坐标的配置点谱方法，求解了与偏振辐射相关的矢量辐射传输方程<sup>[39]</sup>。2018年，西安电子科技大学李京英等人使用球谐离散坐标法，对尾焰紫外辐射特性进行了研究，并讨论了其对紫外辐射源函数的影响<sup>[40]</sup>。2011年，W.Waldenfels 等人提出了一种随机算法，通过假设辐射的转移可以被建模为马尔可夫过程来求解传输方程<sup>[41]</sup>。2017年南京理工大学孙玉杰等人采用蒙特卡罗方法求解 RTE 与能量方程耦合，其结果作为基准解。考虑了瑞利数、普朗克数和光学厚度的影响，所有这些都涵盖了几个数量级。提出并分析了温度分布、传热速率以及精度和计算时间方面的计算性能<sup>[41]</sup>。

在这些求解辐射传输方程的算法基础上，众多科学家结合辐射传输算法开发了各类辐射传输模式软件，并应用于不同的应用场景。早先有 LOWTRAN 模式和 MODTRAN 模式，后来发展了 6S 模式，均可大气校正、地表反射率估计、大气气溶胶和云的遥感应用。

由德国不来梅大学遥感研究所和环境物理研究所联合开发而成的 SCIATRAN 辐射传输模式软件<sup>[42]</sup>，应用于卫星和地基 DOAS 研究领域。由美国国家航空航天局开发的 MYSTIC 模型可反演高空卫星观测数据的气溶胶和气体数据<sup>[43]</sup>。1996年由美国加州大学圣巴巴拉分校提出了 SBDART 辐射传输模式，可以计算在各种大气条件下的短波和长波的辐射通量。用于计算地球大气层和地表间晴朗或全云层覆盖条件下的平面平行大气辐射传输<sup>[44]</sup>。2019年，Ricchiazzi P 等人以数据集的输出用作 SBDART 模型的输入以估计辐射强迫<sup>[45]</sup>。孙因等人于中国东部 2008 个探空站观测到的测深剖面放入 SBDART 模型，计算晴空条件下温度和绝对湿度剖面对辐射通量的影响<sup>[1]</sup>。

2020年张婷等人采用 SBDART 辐射传输模式模拟了红外辐射与云层光学厚度的对应关系<sup>[46]</sup>。陆川等基于斜程能见度检测原理，采用 SBDART 辐射传输模式求解辐射传递方程，对天空背景辐射亮度进行了详细的理论模拟和分析<sup>[48]</sup>。2021年，中科院物理研究所结合 AERONET 北京站观测到的气溶胶光学特征数据，采用 SBDART 辐射传输模式评价了近十年来北京市气溶胶和黑碳（BC）气溶胶的辐射强迫情况<sup>[49]</sup>。王玉峰等人采用激光雷达提供气溶胶参数作为 SBDART 辐射传输模式的输入求解辐射传递方程得到相应的辐射分布，对斜程方向散射辐射和能见度进行了理论仿真<sup>[50]</sup>。2022年，Palacios.RD 等使用

SBDART 模型估计了大气顶部 (TOA) 和表面 (SUR) 的短波气溶胶辐射强迫 (SWARF) 值, 并通过回归分析使用 AERONET 值进行了验证<sup>[51]</sup>。王玉峰等人提出一种人眼安全的双波长拉曼-米激光雷达进行倾斜能见度测量系统, 该系统为 SBDART 模式提供大气气溶胶参数, 从而求解实际大气散射辐射的计算<sup>[52]</sup>。

自 2005 年 Bernhard Mayer 等人推出 libRadtran 模式以来, 被广泛应用于气候变化研究、遥感探测、空气污染监测等领域<sup>[53]</sup>。截止目前已更新迭代到 2020 年最新的 2.0.4 版本。2010 年, 解放军工程学院孙宇等人利用 SBDART 模式和 libRadtran 模式对比分析了水云和冰云辐射特征<sup>[54]</sup>。2018 年, 国防科技大学郭俊杰等人基于 libRadtran 模式结合经典条件下数值模拟结果, 对液态水云偏振特征开展了观测与数值模拟的对比研究<sup>[55]</sup>。2020 年, Vicent, J 等人通过全局灵敏度分析证明了 ALG 在对广泛使用的 6S, MODTRAN 和 libRadtran 辐射模式进行相互比较和研究方面的实用性分析<sup>[56]</sup>。德国 Grob, H 等描述了一种改进的辐射和极化校准方法, 并利用太阳自动辐射计 (SSARA) 测量 501.5nm 的线偏振光时的大气参数数据作为 libRadtran 辐射传输模式的输入验证了 SSARA 观测中回收气溶胶的性能<sup>[57]</sup>。2021 年, Francisco, Molero 等人使用 libRadtran 辐射传输模式计算了大气顶部和底部 0.2  $\mu\text{m}$  至 4  $\mu\text{m}$  之间的辐射强迫, 并将结果与 AERONET 提供的结果进行了比较<sup>[58]</sup>。2021 年, 合工大甘鑫等人提出一种从局部的偏振信息生成全天域的大气偏振模式, 并使用 libRadtran 辐射传输模式对仿真和实测数据实现局部大气偏振模式的生成的验证和比对<sup>[59]</sup>。同年, 崔岩等人运用 libRadtran 仿真分析不同地表反照率下的天空偏振模式, 分析了地表反照率对偏振方位角和偏振度的影响<sup>[60]</sup>。2022 年, Gristey, JJ 等人利用天文台使用大涡模拟 (LES) 模拟了多个嵌入气溶胶的浅层积云场, 并将 LES 衍生的云和气溶胶场摄取到 libRadtran 模式三维蒙特卡罗辐射传输中以模拟表面太阳辐射。

### 1.3 主要研究内容

斜程能见度的精确测量理论中, 获取准确的大气散射辐射亮度是重要步骤之一。本文以大气散射辐射亮度为研究对象, 以平行平面大气模型的 SBDART 辐射传输模式和伪球形大气模型的 libRadtran 辐射传输模式为手段, 开展基于不同辐射传输模式的大气散射辐射亮度对比模拟和相互校正研究, 并将校正后的大气散射辐射亮度结果应用到斜程能见度的测量中。主要研究工作如下:

第二章, 辐射传输方程及辐射传输模式。介绍辐射传输方程的基本理论, 从最原始描述光的辐射传输方程入手, 给出辐射传输方程一般形式, 并针对比尔-伯格定律及 Schwarzschild 方程的解, 得出基于分层大气一维大气单色辐射传输方程的一般求解形式。以及介绍本文中主要采取的两种辐射传输模式, 即平行平面大气模型 SBDART 辐射传输模式和伪球形大气模型的 libRadtran 辐射传输模式, 并简要介绍了两个模式的运行步骤和流程。

第三章, SBDART 模式和 libRadtran 模式对大气散射辐射亮度模拟与对比。通过自定义编写, 实现 SBDART 和 libRadtran 两种辐射传输模式的参数统一配置, 并模拟晴天

和云层天气条件下的大气散射辐射亮度分布。通过对比结果得出：不同天气条件下，SBDART 模式和 libRadtran 辐射传输模式计算的大气散射辐射亮度在不同观测天顶角方向上的分布差异。

第四章，大气散射辐射亮度校正方法的仿真与分析。在 libRadtran 模式的伪球形校正理论的原理上，通过对气溶胶消光系数和校正路径距离两个主要因素的仿真讨论，研究大气校正系数的校正能力和效果。并对不同天气条件下对 SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度进行校正。

第五章，基于激光雷达和辐射传输模式的斜程能见度的实验与验证。在校正方法仿真实现的基础上，利用西安理工大学的斜程能见度激光雷达系统的实测数据开展实际大气条件下大气散射辐射亮度的校正，并将校正结果应用到斜程能见度的测量中。

第六章，总结与展望。总结了本文的主要工作和所得结论，提出了进一步的改进方案和展望。

## 2 辐射传输方程及辐射传输模式

本章将主要介绍与本文相关的大气辐射传输方程和辐射传输模式的基础理论。首先, 从最原始描述光的辐射传输方程入手, 介绍大气辐射传输方程的一般形式; 进而, 针对比尔-伯格定律及 Schwarzschild 方程的解, 给出了基于分层大气一维大气单色辐射传输方程的一般求解形式。最后, 重点介绍本文中主要采用的两种辐射传输模式, 即平行平面大气模型 SBDART 辐射传输模式和伪球形大气模型的 libRadtran 辐射传输模式, 并简要介绍了两个模式的运行步骤和流程, 为后续的大气散射辐射亮度模拟、对比和校正提供理论基础。

### 2.1 辐射传输方程理论

太阳辐射在地球大气层内的传输过程中, 会与大气发生散射和吸收两个物理过程。吸收会减弱太阳光的能量, 而散射会使光在整个传播环境的所有方向上散射。天空背景辐射亮度是由整个大气环境中的散射光产生的。通常把以光谱辐射亮度  $I_\lambda$  作为处理对象的传播方程叫做辐射传输方程<sup>[61]</sup>。辐射传输方程最基本的原理可以看成是一束穿过介质的辐射与物质的相互作用而减弱的过程。如果辐射强度在其传递方向上穿过厚度  $ds$  后变为  $I_\lambda + dI_\lambda$ , 则

$$dI_\lambda = -k_\lambda \rho I_\lambda ds \quad (2-1)$$

其中  $\rho$  是材料的密度,  $k_\lambda$  表示波长  $\lambda$  辐射的质量消光截面。质量消光截面是质量吸收截面和散射截面的总和。定义源函数系数  $j_\lambda$ , 使得由反射和多次散射引起的强度增加为:

$$dI_\lambda = j_\lambda \rho ds \quad (2-2)$$

结合等式(2-1)和(2-2)得到:

$$dI_\lambda = -k_\lambda \rho I_\lambda ds + j_\lambda \rho ds \quad (2-3)$$

此外, 将源函数定义为:  $J_\lambda \equiv j_\lambda / k_\lambda$ , 使得公式(2-3)得到没有任何坐标系的一般辐射传输方程, 表示为:

$$\frac{dI_\lambda}{k_\lambda \rho ds} = -I_\lambda + J_\lambda \quad (2-4)$$

该方程是讨论所有辐射传输过程的基础方程。

地球和大气层辐射的热红外辐射的传输就是考虑一个处于局部热力学平衡的非散射介质下的红外辐射传输。在这个过程中, 我们必须考虑局部热力学平衡, 即各种物质的温度、密度和压力都是相对稳定的。在此基础上引入普朗克函数, 源函数  $J_\lambda$  可以写成:

$$J_\lambda = B_\lambda(T) \quad (2-5)$$

因此，辐射传输方程可以写成：

$$\frac{dI_\lambda}{k_\lambda \rho ds} = -I_\lambda + B_\lambda(T) \quad (2-6)$$

其中  $k_\lambda$  是吸收系数。等式(2-6)右侧的第一项表示由于吸收导致的辐射强度衰减，而第二项表示材料的黑体辐射引起的辐射强度的增加。为了寻求 Schwarzschild 方程的解，我们定义了点 S 和  $S_1$  之间介质的单色光学厚度如图 2-1 所示：

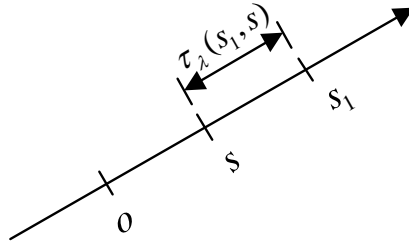


图 2-1 由式(2-7) 定义的光学厚度的构型

Fig. 2-1 Configuration of the optical thickness defined in Eq2-7

光学厚度  $\tau_\lambda$  定义为：

$$\tau_\lambda(s_1, s) = \int_s^{s_1} k_\lambda \rho ds' \quad (2-7)$$

其中  $d\tau_\lambda(s_1, s) = -k_\lambda \rho ds$ , 公式(2-6)可写成：

$$-\frac{dI_\lambda(s)}{d\tau_\lambda(s_1, s)} = -I_\lambda(s) + B_\lambda[T(s)]. \quad (2-8)$$

如果已知介质的温度和密度以及沿光束路径的相关吸收系数，则可以对方程(2-8)进行数值积分，以得出点  $S_1$  处的强度，这个强度可以是光或热能。

在以上理论基础上，引入稀释气体中光子的分布可以用玻尔兹曼方程来描述：

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \nabla_r \cdot (\mathbf{v}f) + \nabla_p \cdot (\mathbf{F}f) = Q(r, \hat{n}, \nu, t). \quad (2-9)$$

这里，光子分布函数  $f(r, \hat{n}, \nu, t)$  随位置 ( $r$ )、传播方向 ( $\hat{n}$ )、频率 ( $\nu$ ) 和时间 ( $t$ ) 而变化。在没有相对论效应的情况下  $\mathbf{F} = 0$ ，光子在碰撞之间以速度  $\mathbf{v} = c\hat{\nu}$  直线传播。使用关系：

$$\nabla_r \cdot (\mathbf{v}f) = f\nabla_r \cdot \mathbf{v} + \mathbf{v} \cdot \nabla f = \mathbf{v} \cdot \nabla f, \quad (2-10)$$

其中  $r$  和  $\nu$  是独立变量，方程式(2-9)可以写成：

$$\frac{\partial f}{\partial t} + c(\hat{n} \cdot \nabla)f = Q(r, \hat{n}, \nu, t) \quad (2-11)$$

与光子分布相关的微分能量为：

$$dE = c h \nu f \hat{n} \cdot dS d\Omega d\nu dt. \quad (2-12)$$

光子的具体强度  $I(r, \hat{n}, \nu, t)$  被定义为

$$dE = I(r, \hat{n}, \nu, t) dS \cos \theta d\Omega d\nu dt, \quad (2-13)$$

其中  $I(r, \hat{n}, \nu, t) = c \nu h f(r, \hat{n}, \nu, t)$  当大气光学系统的状态达到了一个稳定的平衡状态且不随时间的变化而变化的情况下, 方程(2-9)可以写成:

$$(\hat{n} \cdot \nabla) I(r, \hat{n}, \nu) = h\nu Q(r, \hat{n}, \nu). \quad (2-14)$$

该方程必须指定源项  $Q(r, \hat{n}, \nu)$ , 它分内部源和外部源, 内部源指的是介质内部产生的辐射源如热源、自发辐射等, 外部源指从介质外部射入的辐射源, 如太阳光、星光等。这就是关于光一般辐射传输方程的形式。 $\hat{n} \cdot \nabla$  为该方程的流项, 它包括了对向流项(辐射在某一点向外传输的通量)和散射流项(由于介质中存在散射现象而引起的辐射传输通量), 而对于几何大气问题而言, 流项是非常重要的概念。几何大气是指在辐射传输问题中将大气看成一组水平层和垂直列的倾向无限且同性的介质结构。在几何大气中, 流项可以用来描述各层之间和大气表面之间的能量转移过程, 可以计算出辐射通量和亮度温度等重要的大气参数。因此, 流项是研究几何大气的关键因素之一。

## 2.2 辐射传输方程的求解

上一节中给出了一般几何中的辐射传输方程中两个重要的部分: 源项和流项。首先讨论源项方程(2-14)右侧的源项, 包括指定方向和频率上的辐射的所有损失和增益。对于行星大气中的光的传输, 源项可以写成:

$$\begin{aligned} h\nu Q(r, \hat{n}, \nu) &= h\nu Q(r, \theta, \phi, \nu) = -\beta^{ext}(r, \nu) I(r, \theta, \phi, \nu) \\ &+ \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty \beta^{sca}(r, \nu, \nu') \int_0^{2\pi} d\theta' p(r, \theta, \phi; \theta', \phi') I(r, \theta', \phi', \nu') d\nu' \\ &+ \beta^{abs}(r, \nu) B[T(r)]. \end{aligned} \quad (2-15)$$

第一项表示由于光子束的吸收和散射导致的辐射损失。第二项描述了从所有其他方向和频率散射到光束中的光子数量也是多重散射项, 第三项给出了在感兴趣的频率范围内辐射的热辐射量。当近似假设地球大气层的下部处于局部热力学平衡的状态。因此, 太阳的辐射与普朗克函数  $B[T(r)]$  成比例, 能够在所需要的频率或波长区域上进行积分求解。

接下来讨论流项, 流项  $\hat{n} \cdot \nabla$  决定了大气几何模型。在行星大气中, 笛卡尔几何和球面几何是最常见的标准系。在笛卡尔几何中, 通常使用平面平行大气模型近似, 而在球面几何中, 则使用伪球形和球面大气模型近似。在笛卡尔坐标系中平行平面大气中的流项可写成:

$$\begin{aligned} \hat{n} \cdot \nabla &= n_x \frac{\partial}{\partial x} + n_y \frac{\partial}{\partial y} + n_z \frac{\partial}{\partial z} \\ &= \cos \phi \sqrt{1 - \mu^2} \frac{\partial}{\partial x} + \sin \theta \sqrt{1 - \mu^2} \frac{\partial}{\partial y} + \mu \frac{\partial}{\partial z} \end{aligned} \quad (2-16)$$

在平面平行几何中, 大气在  $x$  和  $y$  方向上被划分为无限延伸的平行层。这意味着在  $x$  和  $y$



方向上没有变化。因此，对于这种近似，流项就变成了：

$$\hat{n} \cdot \nabla = n_x \frac{\partial}{\partial x} \quad (2-17)$$

这个近似被许多辐射传输求解器使用，包括广泛使用的 1988 年由 Stamnes 等人提出的 DISORT 求解器。对于大多数大气辐射传输应用，物理上假设大气为笛卡尔坐标系下的平行平面大气的几何结构，见图 2-2 所示，其中 S 为观测目标， $\theta$  为天顶角， $\phi$  为方位角。

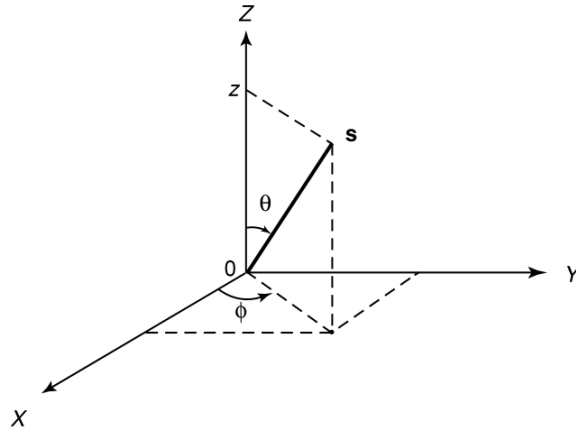


图 2-2 平面平行大气的几何结构，其中  $\theta$  和  $\phi$  分别表示天顶角和方位角，s 表示位置矢量

Fig. 2-2 Geometry for plane-parallel atmospheres where  $\theta$  and  $\phi$  denote the zenith and azimuth angles, respectively, and s represents the position vector.

如果将笛卡尔平行平面坐标系替换为球面坐标系后，流项  $\hat{n} \cdot \nabla$  变成了：

$$\begin{aligned} \hat{n} \cdot \nabla = & \mu \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1-\mu^2}{r} \frac{\partial}{\partial \mu} \\ & + \frac{\sqrt{1-\mu^2} \sqrt{1-\mu_0^2}}{r} \left[ \cos(\phi - \phi_0) \frac{\partial}{\partial \mu_0} \right. \\ & \left. + \frac{\mu_0}{1-\mu_0^2} \sin(\phi - \phi_0) \sqrt{1-\mu^2} \frac{\partial}{\partial (\phi - \phi_0)} \right] \end{aligned} \quad (2-18)$$

通常我们认为实际大气是球对称结构的，所以(2-18)就可简化为：

$$\hat{n} \cdot \nabla = \mu \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1-\mu^2}{r} \frac{\partial}{\partial \mu} \quad (2-19)$$

一般存在多种方法求解一般几何中的辐射传输方程(2-14)。在大气层顶部，一束平行的太阳辐射，其强度为  $I^0$ ，在方向为  $\mu_0$  上表现为：

$$I(z_{toa}, \mu) = I^0 \delta(\mu - \mu_0) \quad (2-20)$$

其中  $\delta(\mu - \mu_0)$  是狄拉克德尔塔 delta 函数。对于边界条件，最好使用 delta 函数。将方程(2-20)插入方程(2-14)，可以看出太阳辐射强度满足：

$$-\mu \frac{dI(z, \mu_0, \phi_0)}{\beta^{ext} dz} = -\mu \frac{dI(z, \mu, \phi)}{\beta^{ext} d\tau} = I(z, \mu_0, \phi_0) \quad (2-21)$$

其中  $\mu_0$  和  $\phi_0$  分别是太阳天顶角余弦和方位角。其中光学厚度定义为  $d\tau = \beta^{ext} dz$ 。则可得到一维平行平面大气中描述光的辐射传输方程：

$$\begin{aligned} -\mu \frac{dI(\tau, \mu, \phi)}{d\tau} = & I(\tau, \mu, \phi) \\ & - \frac{\omega(r)}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi' \int_{-1}^1 d\mu' p(z, \mu, \phi; \mu', \phi') I(\tau, \mu', \phi) \\ & - (1 - \omega(\tau)) B[T(\tau)] \\ & - \frac{\omega(\tau) I^0}{4\pi} p(z, \mu, \phi; \mu_0, \phi_0) e^{-\tau/\mu_0}. \end{aligned} \quad (2-22)$$

式中：

- $\mu_0$  —— 太阳天顶角的余弦值；
- $\phi_0$  —— 太阳方位角；
- $\mu$  —— 观测天顶角的余弦值；
- $\phi$  —— 观测方位角；
- $\tau$  —— 光学厚度；
- $B$  —— 普朗克函数；
- $p$  —— 散射相函数；
- $\omega$  —— 该区域内大气的单次散射平均反照率；
- $I^0$  —— 到达地面的辐射亮度。

## 2.3 辐射传输模式

目前，多种多样的辐射传输模式在不同的算法基础和应用背景下应运而生。不同的辐射传输模式所使用的场景存在很大的差异，典型的辐射传输模式有 LOWTRAN、MODTRAN、6S、SBDART 和 libRadtran 等模式。

由于实际大气中存在较为复杂的气溶胶和云层的分布，并且要求计算速度、准确性和适用性达到现有仪器系统测量的基本要求。本文中，将主要选择开展使用运行流程较为简单、运算速度较快和易批量处理的平行平面大气模型 SBDART 辐射传输模式和高可靠性、多样性和可扩展性的伪球形大气模型 libRadtran 辐射传输模式对大气散射辐射亮度进行模拟、对比和分析。因此，本节中主要针对这两种辐射传输模式做原理介绍。

### 2.3.1 SBDART 辐射传输模式

SBDART 辐射传输模式是由美国加州大学圣芭芭拉分校的风险与环境研究中心使用 DISORT 程序开发的软件工具，它是用于地球大气层和地表间平行平面辐射传输模式<sup>[45]</sup>。SBDART 是基于 FORTRAN 语言开发的软件包，它基本的使用方法是使用 DISORT.f 代

码, 结合 Kirchhoff 定律和菲涅耳公式等辐射传输中的物理机制, 模拟大气中紫外、可见和近红外波段内的光学特性, 用于遥感产品的辐射传输计算。SBDART 模式能够计算在不同时间和地点的大气辐射传输, 其中包括太阳辐射、地表辐射和大气辐射等。该模式可以处理可见光、近红外和紫外波段内各种类型的气溶胶、云、臭氧和水汽等大气成份, 用于计算与地球遥感相关的辐射传输和反演等问题。

在 SBDART 模式中, 考虑到地球半径相对于观测点而言, 忽略了大气的曲率, 在地面高度到 25 km 的大气空间内以 1 km 为间隔, 在高于 25 km 到 50 km 的大气空间内以 5 km 为间隔, 在 70 km 到大气层顶(100 km)的高度上设置为一层。至此, 将 0 km 到 100 km 的整层大气层划分为 33 个水平均匀假设的平行平面大气层, 优化了求解辐射传输方程的步骤。图 2-3 展示了 SBDART 模式大气分层情况。

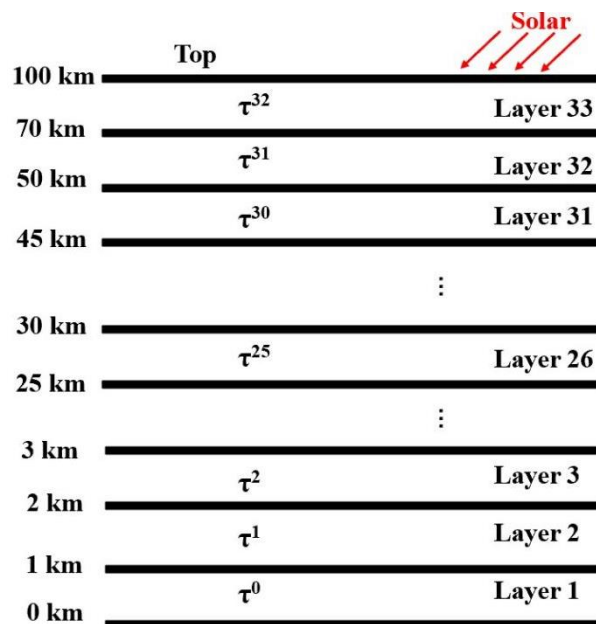


图 2-3 SBDART 模式大气分层

Fig. 2-3 Atmospheric Stratification in the SBDART Model

SBDART 模式使用简单, 只需要几个输入参数即可运行, 且只需要简单的 FOR 脚本代码可实现批量化快速处理。SBDART 模式计算速度快, 尤其适合处理高分辨率、大面积的辐射传输计算。SBDART 模式可以对模拟结果进行可视化输出, 方便后续数据分析和处理。SBDART 模式运行流程如图 2-4 所示。首先根据选择标准气溶胶或根据测量设备或仪器测量反演获得的大气气溶胶特性参数构成气溶胶.dat 文件, 在确定标准大气模型、太阳位置和地外太阳光谱文件后, 设置好用户输出的天顶角和方位角的个数以及其他必要选项, 最后选择模式输出的格式组成 INPUT 输入文件, 之后通过在终端运行指令调用 Drt 程序得到相应的 txt 输出文件, 最后使用 SBDART 数据整理程序将 txt 输出文件的数据进行整理, 然后绘制出计算结果呈现出目标效果。图 2-5 呈现了运行 SBDART 辐射传输模式软件运行的两种方式的界面。

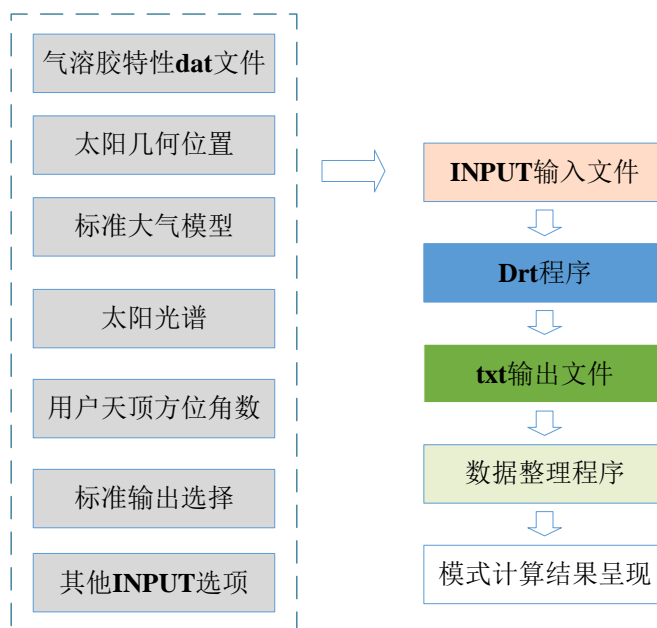


图 2-4 SBDART 模式运行步骤图

Fig. 2-4 Runstep diagram of SBDART model

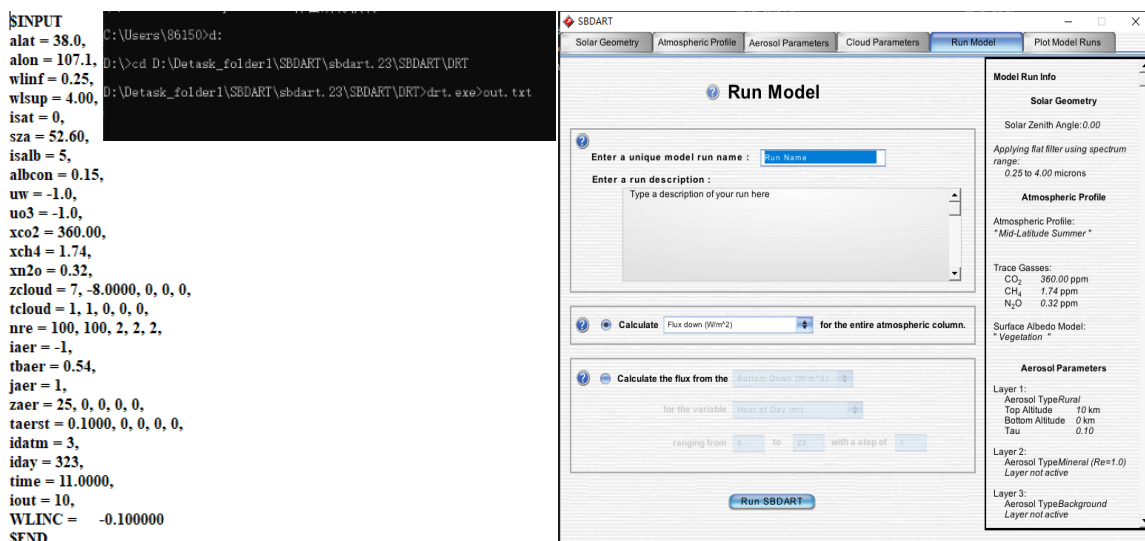


图 2-5 SBDART 终端运行界面及可视化界面

Fig. 2-5 SBDART Terminal Operation Interface and Visualization Interface

### 2.3.2 libRadtran 辐射传输模式

与 SBDART 模式不同，libRadtran 辐射传输模式是一个开源的辐射传输计算库，可以模拟不同地区和季节的大气，同时考虑太阳辐射、大气吸收和散射、地表反射和辐射等效应<sup>[53]</sup>。该模式具有更多的输入选项，包括更复杂的大气化学反应、气象条件、大气层结构等选项。libRadtran 模式使用更为复杂的模拟算法，能够考虑更多的大气参数、光学性质和相互作用效应，生成更准确的模拟结果。自 2005 年以来，该软件包得到了进一步发展，包括新特性和扩展。其中一个重要的扩展是在辐射传输解算器 MYSTIC 中实现偏振，以适应偏振观测的增加。此外，软件包还包括旋转拉曼散射解算器，提高了痕量气

体回收的准确性，并可以用于估计云顶压力和气溶胶特性。还引入了一些最先进的参数化，以提供更精确的辐射计算，特别是在极化辐射传输方面。软件包还进行了优化和改进，提高了数值稳定性和计算速度。

libRadtran 辐射传输软件包的主要核心工具是 uvspec 程序，该模型由以下部分组成：

(1) 需要提供大气状态，例如痕量气体剖面、云液态水含量、云滴尺寸、气溶胶浓度剖面作为模型的输入。(2) 用户可以在各种参数之间进行选择，以将大气状态转换为光学参数属性。(3) 传递大气光学特性给辐射传输方程 (RTE) 解算器。目前，uvspec 中包含多种不同的解算器。本文使用最成熟并广泛应用的离散坐标解算器 DISORT。

对于 libRadtran 模式内置大气分层而言，在 25 km 以下与 SBDART 模式分层一样，以 1 公里为间隔；在 25 km 到 50 km 的大气高度，libRadtran 模式的大气层间隔为 2.5 km，在 50 km 到 120 km 的大气层顶部的高度上，将大气层间隔设置为 5 km，这对于计算太阳辐射在大气层中的传输将更加精准，但这也进一步说明 libRadtran 模式的可靠程度。图 2-6 简要呈现了 libRadtran 模式内大气分层情况。

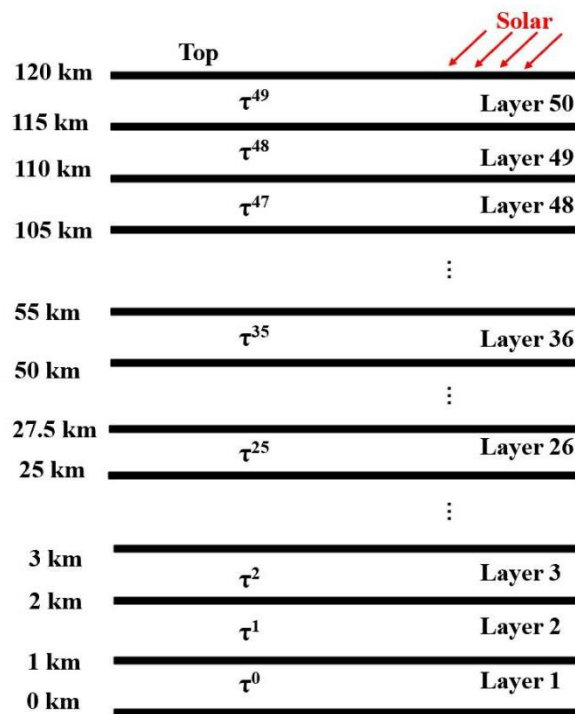


图 2-6 libradtran 模式大气分层

Fig. 2-6 Atmospheric Stratification in the Libradtran Model

libRadtran 模式的运行流程相较于 SBDART 模式稍复杂。首先，根据用户所需，自定义编写所需的太阳光谱、气溶胶特性参数、云层信息等参数.DAT 文件，其次逐步的在输入.INP 文件中逐行添加输入选项，以及调用上一步中的.DAT 文件以及模式运行其他必要的选项代码，最后在该软件包所在的系统下进行 shell 命令的运行最终得到所需的参数输出文件，libRadtran 模式运行步骤如图 2-7 所示。首先根据选择标准气溶胶模型或分层写入设备仪器测量并外部程序反演的大气气溶胶特性参数构成气溶胶 explicit.DAT,

tau.DAT, gg.DAT 和 ssa.DAT 文件，在确定标准大气模型、太阳位置和地外太阳光谱文件后，设置好用户输出的天顶角和方位角的个数以及其他必要选项，最后选择模式输出的结果以及输出结果后处理选项构成.INP 输入文件，之后通过在终端运行指令调用 UVSPEC 程序得到相应的.OUT 输出文件，最后使用 libRadtran 数据整理程序将 OUT 输出文件的数据进行整理，然后绘制出计算结果呈现出目标效果。图 2-8 呈现了 libRadtran 辐射传输模式软件库的两种运行方法的界面。

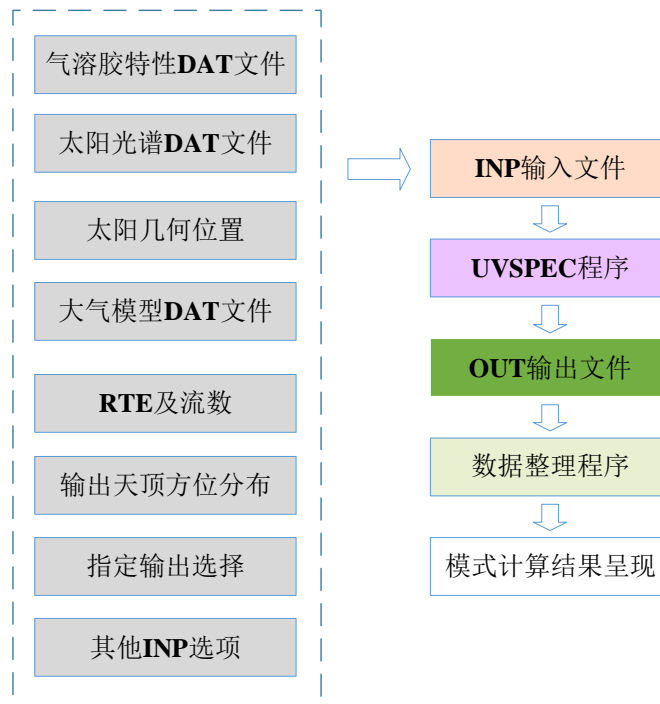


图 2-7 libRadtran 模式运行步骤

Fig. 2-7 Runstep diagram of the libRadtran model

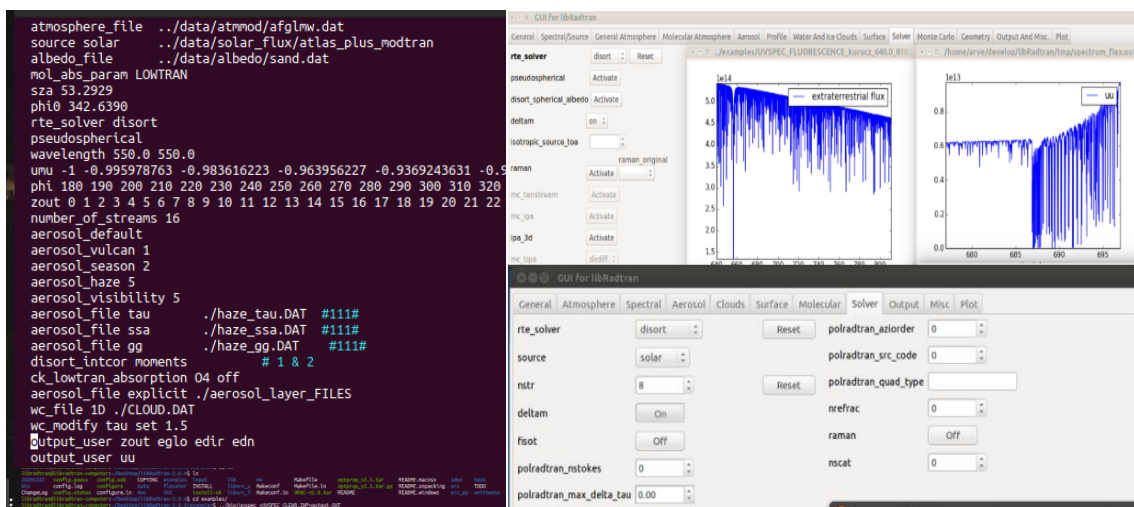


图 2-8 libRadtran 终端运行界面及可视化界面

Fig. 2-8 libRadtran Terminal Operation Interface and Visualization Interface

SBDART 和 libRadtran 辐射传输模式在功能上可以实现对透射率的输出。大气透过

率是指太阳辐射，包括可见光、红外线和紫外线等，通过大气层的传输到达地面的能量比例或比率。目前对于通量的透过率的计算为：以地外太阳辐射通量为分母，到达地面的总辐射通量为分子，两者的比值即为透过率，通常介于 0 和 1 之间，其中 1 表示完全透过，0 表示完全吸收或完全散射。较高的大气透过率意味着较多的太阳辐射能量能够到达地面，而较低的大气透过率则意味着较少的太阳辐射能量能够到达地面。

大气透过率受多种因素影响，包括大气中的气体成分（如水蒸气、氧气、二氧化碳等）、气溶胶（如尘埃、烟雾等）、云层的存在和性质、大气层厚度以及太阳入射角等。这些因素会导致太阳辐射在大气中发生吸收、散射和反射等过程，从而影响大气透过率的大小。SBDART 模式的光谱源自于 MODTRAN，libRadtran 模式中的 reptran 意为适用于光谱波段的代表性波长参数化，这是该模式实用性最高的选项。图 2-9 呈现了正午时分两个模式在可见光波段下所运行的大气透过率随波长的分布情况。在 680 nm 到 780 nm 波段，红橙色出现在这一波段，大气透过率相对较低，390 nm 到 600 nm 波段，蓝色紫色出现在这一波段，大气透过率相对较高。这也是为什么我们能够看到蓝天天空和橙黄或粉红色的晚霞等现象的原因。

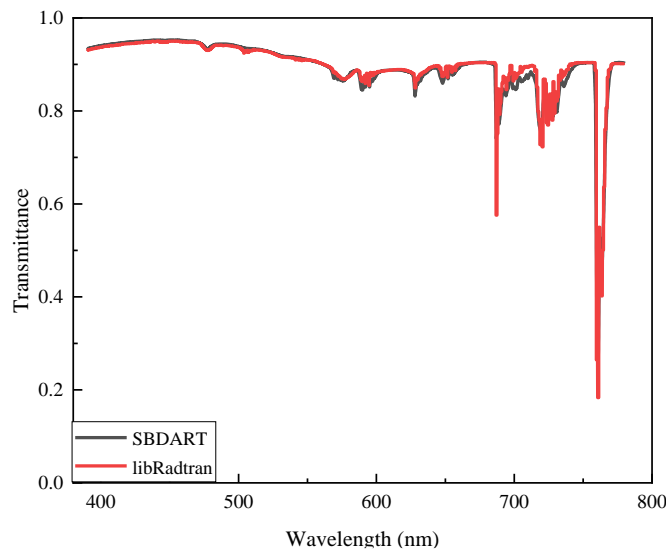


图 2-9 透过率随波长的分布

Fig.2-9 The transmittance with wavelength

## 2.4 本章小结

本章重点介绍了辐射传输方程的基本理论和两种重要的辐射传输模式。我们从最基本的描述光的辐射传输方程开始，给出了适用性较高的辐射传输方程的一般形式。并在比尔伯格定律和 Schwarzschild 方程的解理论的基础上，得出了基于分层大气的一维大气单色辐射传输方程的一般求解形式。此外，重点介绍了基于平行平面大气模型的 SBDART 辐射传输模式和基于伪球形大气模型的 libRadtran 辐射传输模式，对这两个模式的运行步骤和流程做了详细说明。

## 3 SBDART 模式和 libRadtran 模式对大气散射辐射亮度模拟与对比

### 3.1 引言

本章中，基于辐射传输方程及其求解理论，将开展基于 SBDART 模式和 libRadtran 模式的大气散射辐射亮度的模拟和对比分析。首先，需完成两个辐射传输模式的输入参数统一设置。进而在晴天和云层天气条件下，分别利用 SBDART 模式和 libRadtran 模式进行大气散射辐射亮度的模拟，重点探讨不同高度层的大气散射辐射亮度分布、不同方向的大气散射辐射亮度分布和到达地面的太阳直接和散射辐射亮度在两个辐射传输模式下的输出结果并进行分析。以 libRadtran 模式模拟结果作为真值得到的两个模式在较大的天顶角方向下的大气散射辐射亮度的趋势差异，为后续开展的大气散射辐射亮度的校正和实现提供依据。

### 3.2 SBDART 模式和 libRadtran 模式输入参数设置

由于不同的辐射传输模式具有不同的运行环境，在输入参数、输入格式和数据格式等方面均不同，因此，为了能够进行大气散射辐射亮度的模拟和对比，首先应进行参数的标准化设置。下面主要对太阳光谱、大气模型、气溶胶模型等模式内置参数和输入选项进行设置。

#### 3.2.1 太阳光谱参数设置

太阳提供给地球的能量大约占地球总能量的 99.97% 以上，自然界中最大的辐射源就是太阳辐射<sup>[62]</sup>。按照 1976 年 NASA（美国宇航局）的空中探测成果，公布了地球大气外的太阳光谱数据，它在地球大气外的总辐射亮度的平均数是  $1353 \text{ W/m}^2$ 。太阳光谱的能量范围是从  $10^{-10} \text{ m}$  的伽马射线波段延伸至  $100 \text{ m}$  的无线电波长，在日地之间的平均距离处，大气层外测到的太阳光能量有 99.9% 以上都聚集在  $0.217 \mu\text{m}$  到  $10.94 \mu\text{m}$  的波段，其中大约百分之五十的能量在近红外线区域，百分之四十的能量在远可见光区域，百分之九的能量在近紫外线区域<sup>[63]</sup>。SBDART 模式可以运行 LOWTRAN-7、5S 模式中的 MODTRAN2 光谱和 MODTRAN3 光谱数据库。libRadtran 模式使用 Mayer 和他的团队 IFU 结合 MODTRAN3.5 太阳光谱数据库所整合的光谱文件。本文提取了 libRadtran 辐射传输模式中大气顶层的太阳辐射通量的太阳光谱数据，单位为  $\text{W/m}^2/\mu\text{m}$ ，同时在 SBDART 模式中将 libRadtran 模式中的光谱数据编写成 solar.dat 文件适用于 SBDART 模式。该光谱文件信息展示了波长从  $300 \text{ nm}$  到  $800 \text{ nm}$  的范围中太阳光谱的分布图如图 3-1 所示。



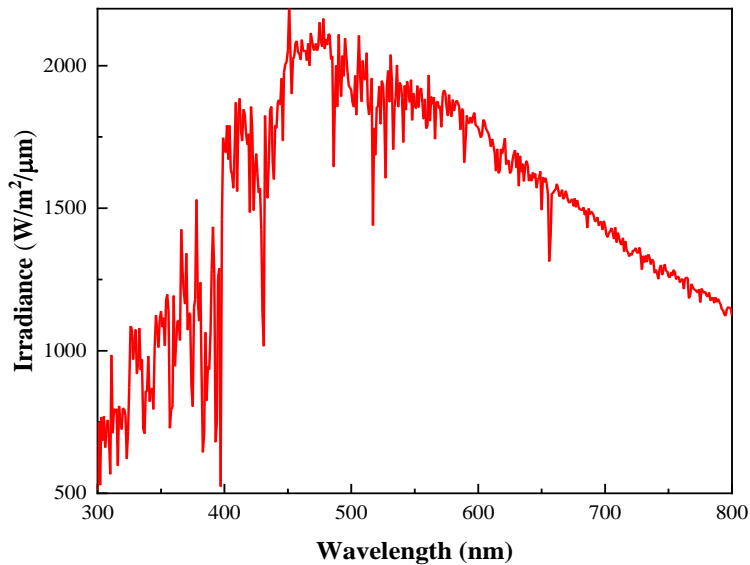


图 3-1 太阳光辐射通量随波长的变化

Fig. 3-1 Variation of solar irradiance with wavelength

### 3.2.2 标准大气模型的设置

标准大气模型是通过对大气的平均特征进行简化和理想化建立的，旨在提供一个参考框架，以便比较和分析大气现象、计算大气参数和进行科学研究。标准大气模型通常包括以下主要特征：

- (1) 温度分布：标准大气模型假设大气温度随高度按照一定规律变化，以提供一个平均温度剖面。这种温度剖面通常是基于观测数据和理论模型得出的。
- (2) 压力分布：标准大气模型使用一个简化的压力剖面来描述大气压力随高度的变化。压力剖面通常遵循一个特定的数学函数形式，如指数函数或幂函数。
- (3) 分子成分：标准大气模型还假设大气的成分是水平均匀且不变的，通常大气中的水蒸气、臭氧等成分被考虑。

SBDART 辐射传输模式采用了 5S 模式大气辐射规范中的六个标准大气剖面，提供了压力、温度、水蒸气和臭氧密度的标准垂直剖面，这些大气模型在 1971 年后被大气研究界广泛使用<sup>[64]</sup>。

而在 libRadtran 辐射传输模式中采用 1986 年 AFGL 的 Shettle 等人基于 1971 年的标准大气模型改进的标准大气模型参数<sup>[65]</sup>，该模型也是基于 1971 年标准大气模型发展而来的。该标准大气模型处理提供了热带、中纬度夏季、中纬度冬季、亚北极夏季、亚北极冬季和 US76 六种基本标准大气模型外，同时还包含主要痕量气体（如二氧化碳和二氧化氮）混合大气模型。因此，在两个模式的对比过程中需要将模式内部的标准大气模型中具体参数进行统一配置。

以两个模式共有的中纬度冬季大气模型为例进行参数统一的说明。图 3-2 为 SBDART 模式中纬度冬季的标准大气模型的压力、温度、水汽和臭氧廓线分布。图 3-3

为 libRadtran 模式中纬度冬季模型的的压力、温度、水汽和臭氧廓线分布。

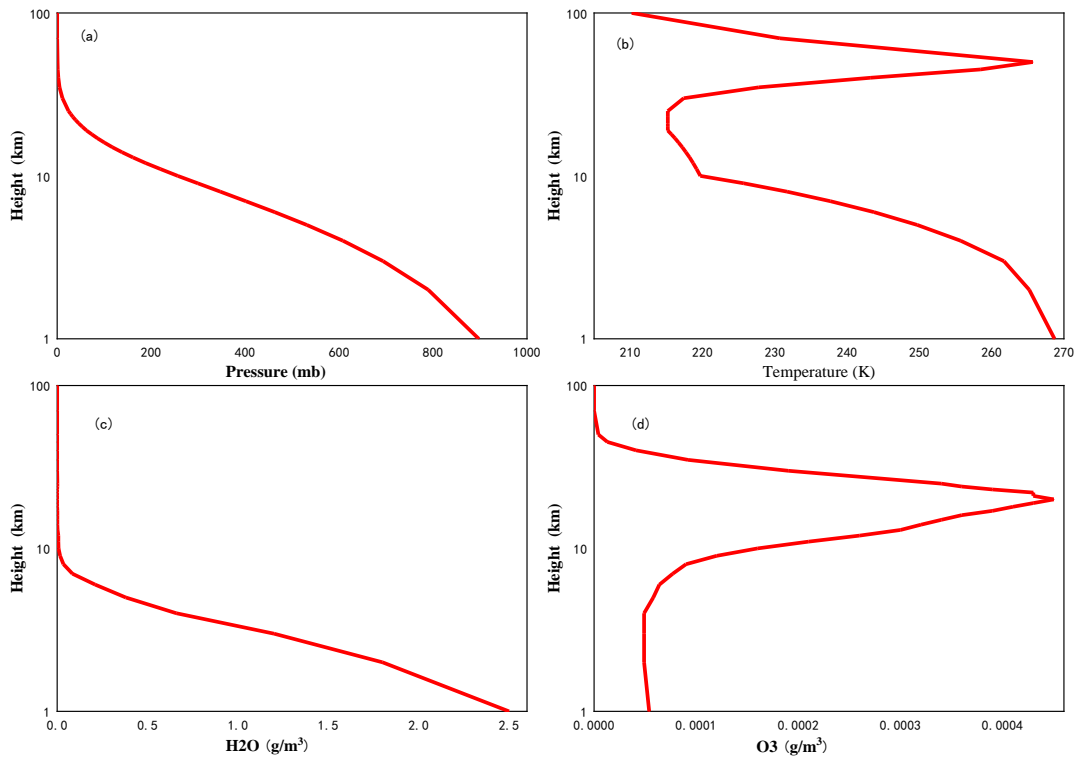


图 3-2 SBDART 中纬度冬季大气参数随高度分布情况 (a) 大气压强 (b) 温度 (c) 水汽 (d) 臭氧

Fig. 3-2 Atmospheric distribution with altitude in mid latitude winter in SBDART

(a) Atmospheric pressure (b) Temperature (c) Water vapor (d) Ozone

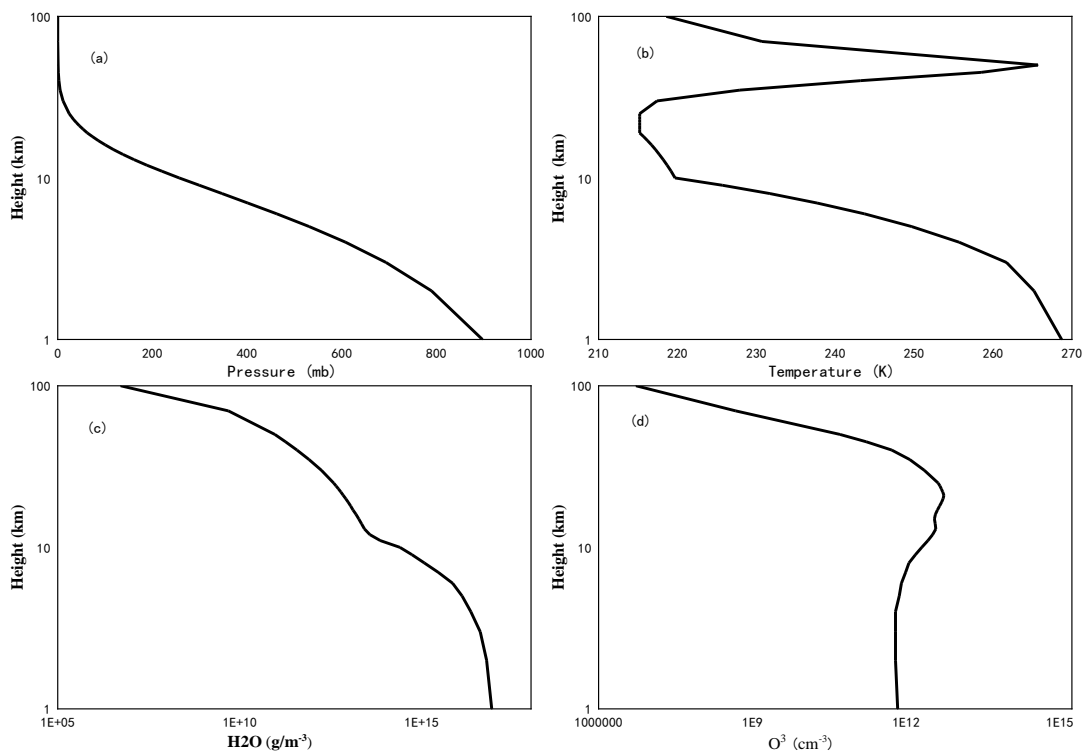


图 3-3 libRadtran 中纬度冬季大气参数随高度分布情况 (a) 大气压强 (b) 温度 (c) 水汽 (d) 臭氧

Fig. 3-3 Atmospheric distribution with altitude in mid latitude winter in libRadtran

(a) Atmospheric pressure (b) Temperature (c) Water vapor (d) Ozone

可以看出，两个模式的标准大气模型中压力、温度及水汽的廓线分布趋势一致，仅在 100 km 处存在很小的差异。而在大气臭氧浓度的分布廓线上，在 14 km 到 20 km 的高度范围内，libRadtran 模式给出的大气臭氧含量明显小于 SBDART 模式的结果。另外，我们发现，SBDART 模式中大气水汽分子和臭氧分子的单位采用  $\text{g}/\text{m}^3$ ，表示每立方米空气中水汽的质量，这是一种质量浓度的单位；在 libRadtran 模式中，采用  $\text{cm}^{-3}$ ，表示每立方厘米空气中分子的数量。为了实现统一设置需要进行单位制转化。从数量单位转化到质量浓度单位时，需要在数量单位的基础上乘物质的量再除阿伏伽德罗常数  $N_A$ ，最后整体乘  $10^6$  即可转换为  $\text{g}/\text{m}^3$ 。因此，为了确保输入标准大气模型的统一设置，本文以 SBDART 模式的臭氧分布作为参考，将 libRadtran 模式内给出的臭氧分布廓线进行重新编写，以达到两个模式间大气模型参数的统一。同时，为了保证输出高度的统一，本文在 libRadtran 输入中使用 zout 选项，将两个模式的输出高度统一到 33 层输出。

### 3.2.3 气溶胶类型的设置

边界层气溶胶是指存在于大气边界层（地表至大气边界层顶部）内的微小固体或液体颗粒物。这些颗粒物可以是悬浮在空气中的固体颗粒、液滴或其它形式的微粒，其尺寸通常在几纳米到几十微米之间。边界层气溶胶的来源多种多样，包括自然源和人为活动。自然源包括植物释放的挥发性有机化合物、海洋喷溅、火山喷发和沙尘暴等。人为活动可以产生大量的气溶胶，如工业排放、交通排放、燃烧排放和农业活动等。边界层气溶胶对大气和环境具有重要影响。它们在大气中发挥着多种作用，如影响大气能量平衡、参与云和降水形成、对太阳辐射的散射和吸收等。

SBDART 辐射传输模式中包含的气溶胶模型来源于 AFGL 的 shettle 等人开发的 5S 模型和 LOWTRAN7 计算机代码中提供的四种边界层气溶胶模型，包括乡村、城市、海洋等模型。而 libRadtran 辐射传输模式内置边界层气溶胶模型为 1989 年 Shettle 等人提供的边界层气溶胶模型，包括乡村、城市、海洋和对流层型气溶胶模型<sup>[66]</sup>。前后两个版本的气溶胶在精度和气溶胶粒子上进行了更新。在本文中，根据实际环境应用需求，采用 SBDART 模式和 libRadtran 模式内共有的城市气溶胶模型或 SBDART 模式输出的光学厚度增量、不对称因子和单次散射反照率等气溶胶特性参数逐层编写作为 libRadtran 模式气溶胶特性的输入选项。

### 3.2.4 地表反照率模型设置

地表反照率是指地表物质表面向各个方位上反映太阳光总辐射通量和达到该物质表面上的总辐射通量之比，被认为是朗伯体即地表反照率是各向同性的。地表反照率也可利用遥感图像中给出的辐射亮度值或反照率，以及二向化反射率分布函数 BRDF 来得到。在不同的地表状况下，其对地表反照率的取值也是有所不同的。它可以确定大气层所吸纳太阳光辐射能的多少，是直接影响大气层能源收支的重要参数。地表反照率随地表植被、土质、积雪覆盖类型，以及构造改变而发生变化。根据地面过程模型或气候模拟，

对地表反照率的确定误差将造成许多重大的负面影响。SBDART 模式内置参数有雪盖、清水、湖面、海面、沙地、植被、海水以及自定义的地表反照率参数。这些基本类型的组合可以有效地近似大多数实际地表条件的光谱反射率，当然也可以自定义地表反照率数据文件。

libRadtran 模式同样有草地、土壤、沙地、自定义等地表反照率文件。如图 3-4 所示给出了自定义城市地表反照率随波长的变化曲线，可以看出，城市反照率随着波长发生改变，在紫外到可见波段，反照率逐渐增大，随着波长的增加，反照率急剧增大，在 800 nm 处的城市反照率达到 0.25 以上。为了实现 SBDART 模式和 libRadtran 模式在地表反照率输入参数的统一化，在本文中，首先利用 libRadtran 模式的地表反照率模型曲线，并将其编辑为 SBDART 模式所需的 urban\_albedo.dat 文件，以供 SBDART 模式进行调用，这样可以满足两个辐射传输模式在地表反照率的输入一致。

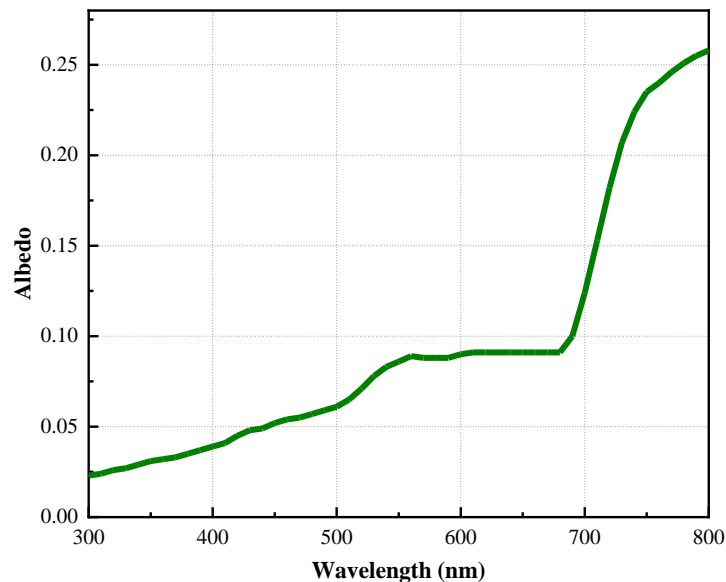


图 3-4 地表反照率随着波长分布曲线

Fig. 3-4 Surface Albedo distribution curve with wavelength

### 3.2.5 云层分布参数的设置

云层是由水蒸气在大气中凝结形成的可见水滴或冰晶的集合体。云层和气溶胶之间存在密切的关系。气溶胶颗粒在大气中充当云凝结核，是云滴和冰晶形成的种子。在大气中，水蒸气需要一个凝结核来形成云滴或冰晶，而气溶胶颗粒提供了这样的凝结核。云滴或冰晶的形成过程需要在凝结核表面上发生，水蒸气逐渐凝结在凝结核上，形成云的微观结构。需要注意的是，气溶胶-云之间的相互作用是一个复杂的过程，受到许多因素的影响，如气溶胶特性、云的类型和环境条件等。为了分析通过云层的辐射传输特性，辐射传输模式使用散射相位函数的 Henyey-greenstein 参数化。这种近似仅取决于对称因子，并且已被证明在应用于辐射通量计算时提供了良好的精度<sup>[67]</sup>。

在 SBDART 模式输入列表中，简单的全天空云层覆盖可以由三行输入项定义例如：

zcloud = 1, -3; tcloud = 1, 1; nre = 10, 10。在这个例子中，一个连续的云层被定义，从 1 公里延伸到 3 公里，并具有总值为 1 的光学厚度和  $10\ \mu\text{m}$  的有效半径。同样的云层在 libRadtran 模式中最简单的描述方式为：定义云层总光学厚度：wc\_modify tau set 1 的命令和一个 CLOUD.DAT 文件，其中包括云层分布高度 Z 单位为 km 本文中在 3 km 处设置云层，有效离子半径 NRE 单位为  $\mu\text{m}$ ，与 SBDART 模式一致设置为  $10\ \mu\text{m}$ 。液态水含量 LWC 设置为  $1\ \text{g}/\text{m}^3$ 。

### 3.3 SBDART 和 libRadtran 模式对大气散射辐射亮度的模拟与对比

#### 3.3.1 晴空天气条件下大气散射辐射亮度的对比

不同天气条件下，大气散射辐射亮度的分布将呈现出不同的效果，本文首先仿真分析晴空无云天气下大气散射辐射亮度的分布情况。与云层比较，太阳辐射在晴空天气条件下大气中的传输过程相对简单，太阳辐射在大气中仅会受到气溶胶和大气分子的散射与吸收。一般情况下，高空中的气溶胶含量较少，所以在较高处的大气气溶胶消光系数较小，低空大气气溶胶含量增大，太阳辐射所受到的大气消光作用会变强，大气气溶胶粒子引起的散射作用也增强。接下来，将利用 SBDART 和 libRadtran 两个模式模拟在冬季的大气散射辐射亮度分布。大气模型设置为中纬度冬季大气模型，选用城市气溶胶模型输出量作为边界层气溶胶的输入参数，太阳天顶角设置为  $70^\circ$ ，太阳方位角设置为  $230^\circ$ ，输出波长为  $0.55\ \mu\text{m}$ ，地表反照率使用统一后的 urban\_albedo.dat 文件数据，大气水平能见度设置为 20 km。在大气层的设置中，默认 100 km 为大气层顶，共分为 33 层，在 0-25 km 内，以 1 km 为间隔，在 25-50 km 内，以 5 km 为步长共 5 层，50-70 km 和 70-100 km 各为 1 层；在天顶角设置中，将  $0-180^\circ$  范围内，设置以  $5^\circ$  为间隔，共有 36 个天顶角方向上的输出量；对于  $0-360^\circ$  方位角，以  $10^\circ$  为间隔，共有 37 个方位角方向上的输出量，因此，可获得由 43956 个数据点的输出列表。在本文中，主要以下行辐射的  $90^\circ-180^\circ$  输出天顶角， $270^\circ$  输出方位角为例，开展大气散射辐射亮度的模拟对比。

该天气条件下大气气溶胶光学厚度增量和光学厚度随高度的分布如图 3-5 所示。其中图 3-5 (a)给出了光学厚度增量随高度的变化的趋势，可以看出：随着高度的升高，光学厚度增量逐渐减小，在 4 km 以上的高度，光学厚度增量的变化较小。如图 3-5 (b)所示，整层气溶胶光学厚度为 0.41 左右，气溶胶光学厚度随着高度的升高而逐渐增大，在 20 km 处达到 0.4，从 20 km 到 100 km 缓慢增加至 0.41 左右。

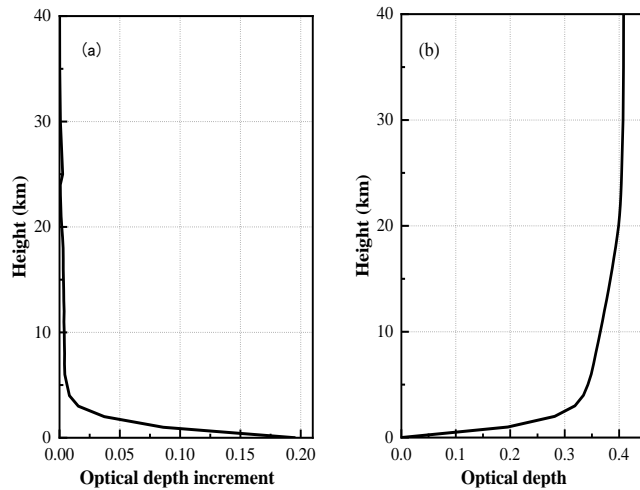


图 3-5 晴天条件光学厚度增量及光学厚度随高度的分布 (a)光学厚度增量 (b)光学厚度  
Fig. 3-5 Optical depth increment and optical depth distribution with height under clear condition  
(a) Optical depth increment (b) Optical depth

分别利用 SBDART 模式和 libRadtran 模式进行模拟，得到不同高度层的大气散射辐射亮度分布、不同方向的大气散射辐射亮度分布以及到达地面的太阳直接和散射辐射亮度在两个辐射传输模式下的输出结果，并对结果进行分析。首先对到达地面的太阳直接和散射辐射亮度的模拟结果进行对比分析，结果如图 3-6 所示。

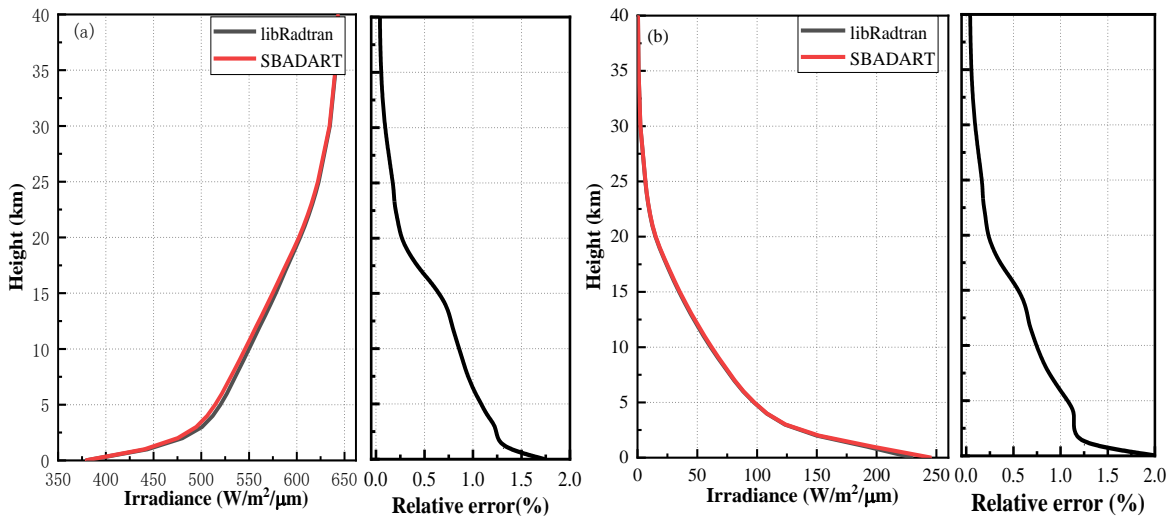


图 3-6 两种模式辐射亮度随高度及相对误差分布情况 (a) 直接和散射辐射亮度 (b) 散射辐射亮度  
Fig. 3-6 Distribution of irradiance between modes with height and relative error  
(a) Solar direct and diffuse irradiance (b) Diffuse irradiance

在大气层顶部地外太阳辐射亮度约为  $645 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}$ 。在 20 km 以上的高度，大气分子和大气气溶胶的含量很低，太阳辐射几乎没有衰减。从 20 km 到地表这段高度中，尤其是 10 km 以下，氮气、氧气、水汽二氧化碳和稀有气体等大气分子和大气气溶胶含量逐渐增加，对大气辐射传输的吸收、消光和反射作用增强，造成达到地面的直接和散射辐射亮度降低到  $378 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}$  左右如图 3-6(a)所示。越接近地面高度，大气气溶胶和大气分子数量的增加会导致太阳辐射的散射的作用增强，使得大气散射辐射亮度随着高度

的降低而增大，到达地面的散射辐射亮度最大，为  $245 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}$  如图 3-6 (b)。从图 3-6 的比较结果发现，在太阳天顶角小于  $90^\circ$  时，平行平面大气模型和伪球形大气模型所计算的大气辐射亮度运算差异较小，这一结论已经被 A.Dahlbck 和 K.Stamnes 于 1990 年证实<sup>[68]</sup>。大气直接和散射辐射亮度相对误差在 1.7% 以内，散射辐射亮度的相对误差在 2% 以内。

图 3-7 到图 3-9 列举说明了晴天条件下由 SBDART 模式和 libRadtran 模式模拟得到的不同高度层上大气散射辐射亮度分布和结果比较情况。图中横坐标为方位角，纵坐标为天顶角。图 3-7 为两个模式模拟在地面处的大气散射辐射亮度分布，图中依次对应 libRadtran 模式、SBDART 模式以及差异。通常，晴空大气条件下，靠近地面的大气散射辐射亮度分布相对较大其最大值出现在太阳所在位置处，称之为日周光；在逐渐远离太阳位置时，散射辐射亮度值迅速衰减，最小值呈现距太阳位置角距离约  $90^\circ$  的位置<sup>[69]</sup>。图中可以看出，在地面高度的太阳位置处，使用平行平面大气模型的 SBDART 模式计算的全天空辐射亮度太阳位置达到最大值，约为  $1615 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ ，由 libRadtran 模式所计算的全天空辐射亮度最大值略小于 SBDART 模式，约为  $1450 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。另外，在较大输出的天顶角方向上，SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度大于 libRadtran 模式。以伪球形大气模型 libRadtran 模式模拟结果作为真值，得到两个模式运算的大气散射辐射亮度的直接偏差如图 3-7 (c) 所示。最大的偏差出现在太阳的位置约为  $165 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。呈现出靠近圆心位置的亮度偏差较小，靠近圆周的偏差较大。

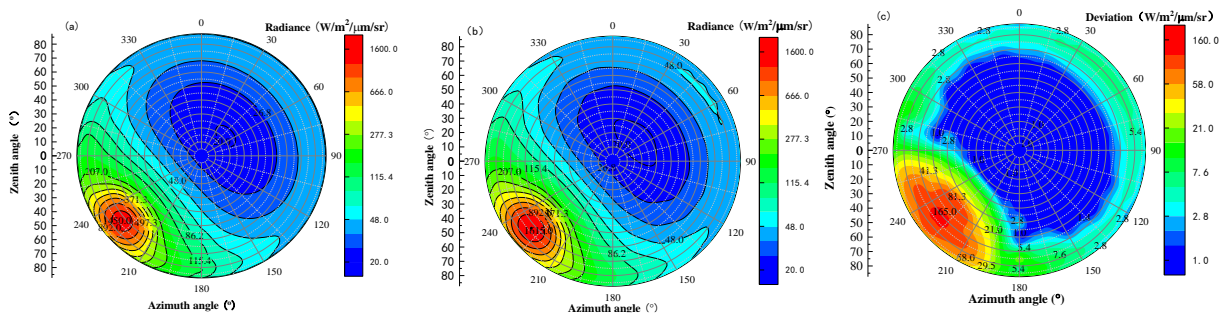


图 3-7 大气散射辐射亮度分布情况 (a) libRadtran-0 km (b) SBDART-0 km (c) 偏差

Fig. 3-7 Atmospheric scattered radiance distribution (a) libRadtran-0 km (b) SBDART-0 km (c) Deviation

图 3-8 给出了 3 km 高度层上的大气散射辐射亮度分布结果和比较。图 3-8 中 (a) 和 (b) 分别对应 libRadtran 模式和 SBDART 模式的亮度，图 3-8 (c) 则为以 libRadtran 模式计算结果作为真值，两个模式的大气散射辐射亮度直接偏差分布。可以看出，在 3 km 高度层上，SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度在太阳位置偏向地平线方向达到最大值，约为  $596 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ ，由 libRadtran 模式所计算的大气散射辐射亮度最大值略小于 SBDART 模式，约为  $500 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。当高度升高到 3 km，大气中气溶胶含量随着高度的升高而下降，进而大气散射辐射亮度在降低。两个模式计算的大气散射辐射亮度的最大偏差为  $96 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。3 km 高度层上两个模式运算的大气散射辐射亮度的偏差小于地

面高度的最大偏差。在两个模式全天空大气散射辐射亮度的直接偏差呈现出：靠近圆周较大观测天顶角的偏差较大，靠近圆心较小观测天顶角的方向上偏差较小。

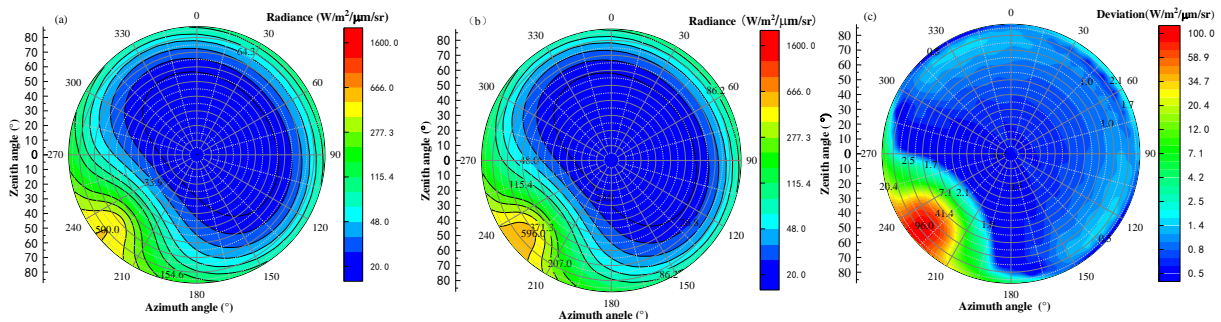


图 3-8 大气散射辐射亮度分布情况 (a) libRadtran-3 km (b) SBDART-3 km (c) 偏差

Fig. 3-8 Atmospheric scattered radiance distribution (a) libRadtran-3 km (b) SBDART-3 km (c) Deviation

图 3-9 给出了 6km 高度层上的大气散射辐射亮度分布结果和比较。图 3-9 中 (a) 和 (b) 分别对应 libRadtran 模式和 SBDART 模式的亮度，图 3-9 (c) 则为两个模式的大气散射辐射亮度直接偏差分布。可以看出，在 6 km 高度层太阳位置处，SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度在太阳所在的位置更偏向地平线的位置达到最大值，约为  $482 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ ，由 libRadtran 模式所计算的大气散射辐射亮度最大值略小于 SBDART 模式，约为  $466 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。当高度升高到 6 km，大气中气溶胶含量相较于 3 km 高度处更低，气溶胶散射作用降低，进而大气散射辐射亮度更低。两个模式计算的大气散射辐射亮度的最大偏差为  $96 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。6 km 高度层上两个模式运算的大气散射辐射亮度的偏差小于 3 km 高度的最大偏差。在图 3-9 (c) 中呈现出，靠近圆周的偏差较大靠近圆心位置偏差较小，与 3 km 高度处相比较大的天顶角方向上偏差在减小。

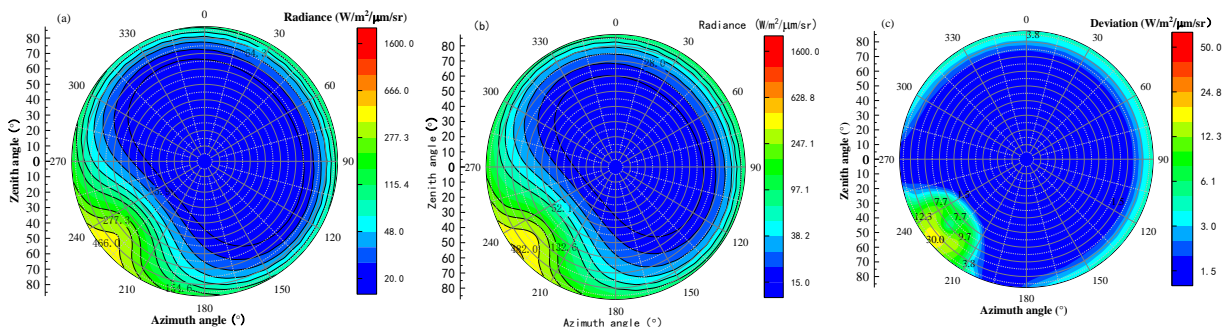


图 3-9 大气散射辐射亮度分布情况 (a) libRadtran-6 km (b) SBDART-6 km (c) 偏差

Fig. 3-9 Atmospheric scattered radiance distribution (a) libRadtran-6 km (b) SBDART-6 km (c) Deviation

在晴空天气条件下，随着高度的升高，两个模式模拟得到的大气散射辐射亮度的最大值在减小，由偏差图圆周位置处可反应出两个模式间的偏差在天顶角较大的方向上较大，并且也随着高度的升高呈现减小的趋势。

另外，本文对不同观测天顶角方向上的大气散射辐射亮度分布也做了对比和分析。这里以方位角为  $270^\circ$  方向为例，进行不同观测天顶角方向上大气散射辐射亮度的分析。



在不同观测天顶角方向上，大气散射辐射亮度均会随着距离的增加而减小。图 3-10 呈现了在不同的观测天顶角的条件下，大气散射辐射亮度随高度分布的情况。图中分别对应  $85^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $30^\circ$  天顶角下的两个模式模拟的大气散射辐射亮度的结果以及以 libRadtran 模式模拟结果作为真值得到的两个模式的直接偏差。

图 3-10 (a)-(b) 分别为  $85^\circ$  和  $80^\circ$  方向上大气散射辐射亮度对高度的变化曲线，可以看出，SBADART 模式模拟得到的大气散射辐射亮度要高于 libRadtran 模式的结果，特别是在接近地面的高度上，两个模式运算结果的最大偏差达到最大约  $25 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ ，这是由于在边界层高度以下的高度范围内，大气中气溶胶聚集造成，光学厚度增大，使得在不同辐射传输模型下的大气散射辐射亮度的差异增大。随着输出高度的升高，两个模式运算的大气散射辐射亮度的偏差逐渐减小，分布趋势逐渐一致。图 3-10 (c) 为  $45^\circ$  大气散射辐射亮度对高度的变化曲线，可以得到该方向上两个模式间大气散射辐射亮度的最大偏差减小到  $13 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$  以内，并且两个模式所运算的大气散射辐射亮度曲线接近一致。随着天顶角的降低，两个模式模拟的结果如图 3-10 (d) 所示，当天顶角为  $30^\circ$  时，此时两个模式模拟得到的大气散射辐射亮度结果的最大偏差较小，仅为  $7 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。

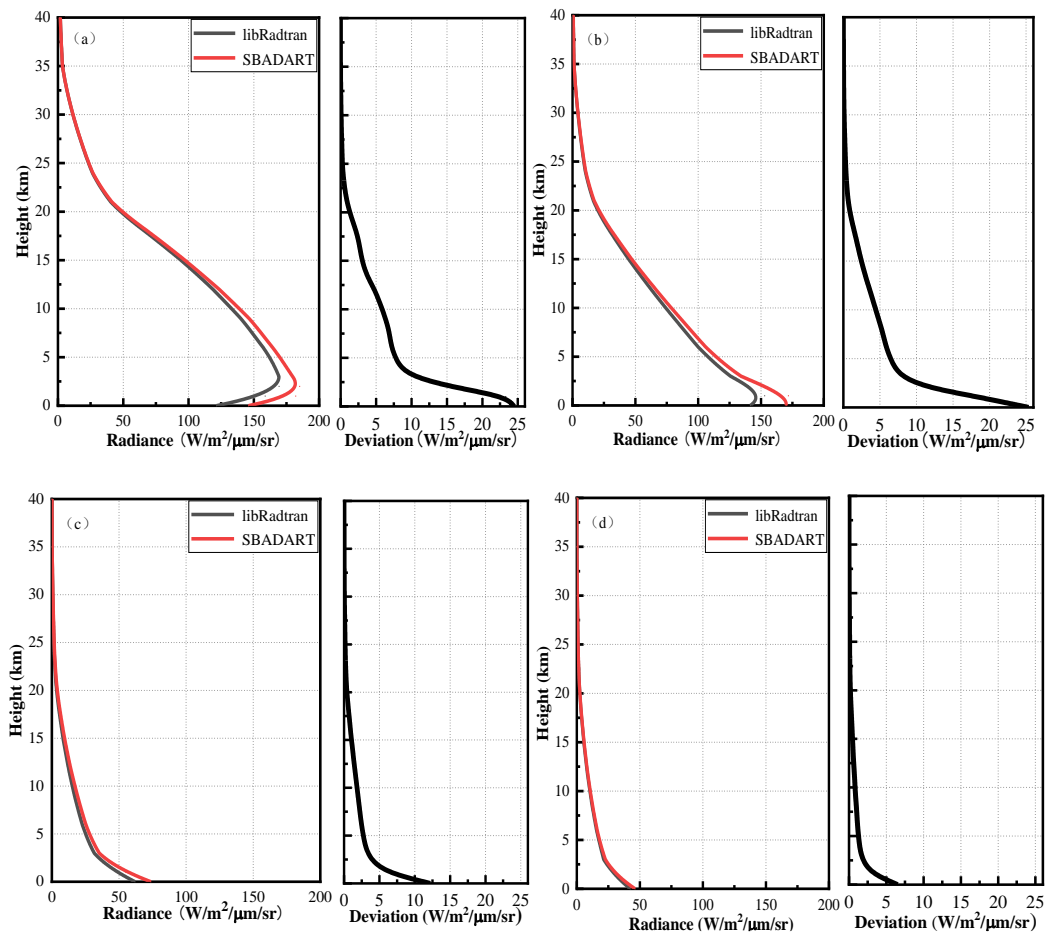


图3-10 两种模式指定方向大气散射辐射亮度随高度分布情况及相对误差

(a)  $85^\circ$  (b)  $80^\circ$  (c)  $45^\circ$  (d)  $30^\circ$

Fig. 3-10 Distribution of scattered radiance with height and relative error in direction of two models

(a) $85^\circ$  (b)  $80^\circ$  (c)  $45^\circ$  (d)  $30^\circ$

为了更清晰表示不同天顶方向上两个模式模拟结果的差异，我们在  $0-90^\circ$  观测天顶角范围内，以  $5^\circ$  为步长，以 libRadtran 模式模拟结果作为真值，获得两个模式下大气散射辐射亮度的偏差随观测天顶角变化趋势，结果如图 3-11 所示。可以看出：(1) 针对不同的观测天顶角方向，各个高度层上模拟得到的亮度偏差随着观测天顶角方向的增加而增大；在观测天顶角低于  $25^\circ$  时，各个高度层上模拟得到的亮度偏差较小；当观测天顶角增大到  $70^\circ$  及以上时，两个模式间的偏差急剧增加，最大值达到  $25 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$  左右。(2) 针对于不同高度层上，在地面高度处，SBDART 模式和 libRadtran 模式模拟的亮度偏差要明显大于其他高度层的结果。因为平行平面大气模型高估了较大的观测天顶角方向上的光学厚度分布，随着观测天顶角的变大，根据两个不同辐射传输模式计算得到的大气散射辐射亮度之间的偏差在较低的高度上比在较高的高度上更明显。

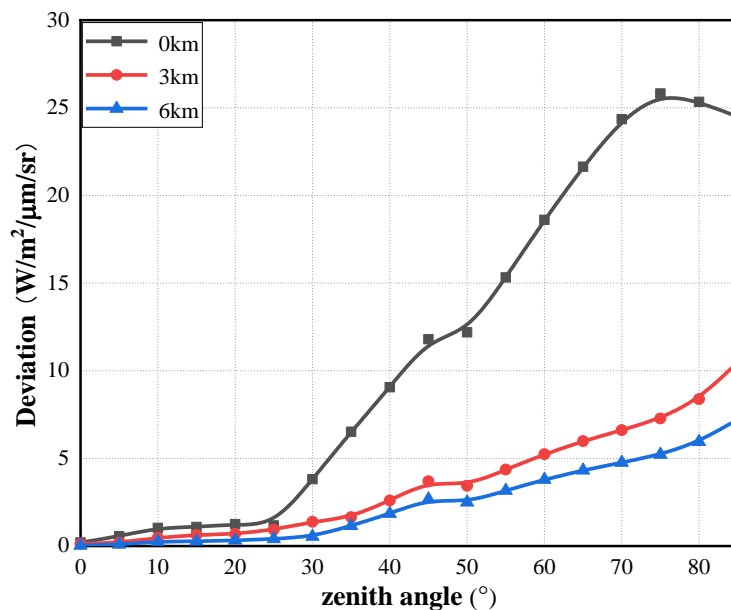


图 3-11 不同高度上直接偏差随观测天顶角的变化分布

Fig. 3-11 The distribution of deviation with the observation zenith angle at different heights

### 3.3.2 云层天气条件下大气散射辐射亮度的对比

我们在上一节晴天条件下加入云层分布的光学参数来探究云层天气条件下天空背景辐射亮度的情况。除了上一节的输入参数外，还定义了一个  $3 \text{ km}$  延伸到  $4 \text{ km}$  分布的云层，整层云层光学厚度总值为 1，水云粒子有效半径为  $5 \mu\text{m}$ 。图 3-12(a) 给出了光学厚度增量随高度变化趋势，可以看出，随着高度的升高，光学厚度增量逐渐减小，由于  $3 \text{ km}$  处云层的出现对太阳辐射的散射作用增强，光学厚度增量的陡然增加。气溶胶急剧减少，光学厚度增量的变化较小。随着高度的升高，光学厚度增量呈现出减小的趋势。在  $20 \text{ km}$  以上的高度，气溶胶急剧减少，光学厚度增量的变化较小。气溶胶光学厚度随着高度的升高而逐渐增大，整层气溶胶光学厚度为 1.41 左右。

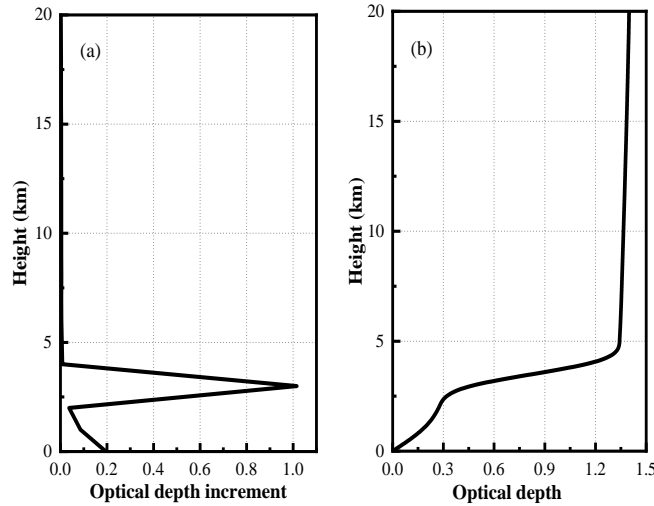


图 3-12 云层条件下光学厚度增量及光学厚度随高度的分布 (a) 光学厚度增量 (b) 光学厚度  
 Fig. 3-12 Optical depth increment and optical depth distribution with height under cloudy condition  
 (a) Optical depth increment (b) Optical depth

分别利用 SBDART 模式和 libRadtran 模式进行模拟，得到不同高度层的大气散射辐射亮度分布、不同方向的大气散射辐射亮度分布以及到达地面的太阳直接和散射辐射亮度在两个辐射传输模式下的输出结果，并对结果进行分析。首先对到达地面的太阳直接和散射辐射亮度的模拟结果进行对比分析。图 3-13 显示了直接和散射辐射亮度和散射辐射照度随高度分布的情况。在大气层顶部地外太阳辐射亮度约为  $645 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}$ 。可以看出从 3 km 到 4 km 整云层的出现，太阳直接和散射辐射照在这个高度上有一个锐减的变化，从  $515 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}$  因此降低到  $380 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}$  左右，并在地面高度处衰减到  $285 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}$  如图 3-13 (a)所示。云层的出现会使太阳辐射的散射的作用增强，使得散射辐射亮度在 3 km 处骤增至  $365 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}$  左右，由于云层的阻挡，云层以下的散射辐射亮度相对于云层处在减小，到地面的散射辐射亮度约为  $280 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}$  如 3-13(b) 所示。两个模式的大气直接和散射辐射亮度和散射辐射亮度的相对误差在 4.3 % 以内。

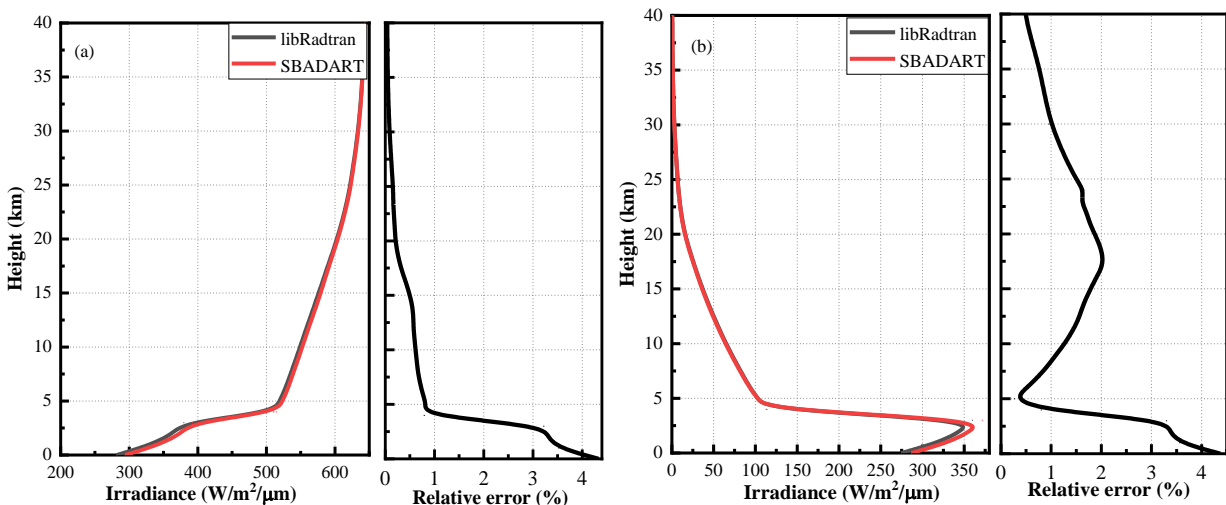


图 3-13 两种模式辐射亮度随高度及相对误差分布情况 (a) 直接和散射辐射亮度 (b) 散射辐射亮度  
 Fig. 3-13 The distribution of irradiance between models with height and relative error  
 (a) Solar direct and diffuse irradiance (b) Diffuse irradiance

图 3-14 到 3-16 列举说明了云层天气条件下由三个高度上由 SBDART 模式和 libRadtran 模式模拟得到的不同高度层上大气散射辐射亮度随高度的分布情况。图中横坐标为方位角纵坐标为天顶角。图 3-14 为两个模式模拟在地面(0km)处的大气散射辐射亮度分布，图中依次对应 libRadtran 模式、SBDART 模式以及模式间的偏差。从图中可以看出，地面高度在太阳位置处，使用平行平面大气模型的 SBDART 模式所计算的全天空辐射亮度太阳位置达到最大值，约为  $896 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ ，由 libRadtran 模式所计算的全天空辐射亮度于太阳的位置的最大值略小于 SBDART 模式，约为  $720 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。另外，且在较大输出的天顶角方向上，SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度大于 libRadtran 模式。图 3-14 (c)中，以 libRadtran 模式模拟结果作为真值，得到两个模式模拟的大气散射辐射亮度的直接偏差。可以看出最大偏差出现在太阳位置处为  $176 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。观测天顶角较大的方向上两个模式的偏差较大，而在较小的观测天顶角方向上偏差较小，呈现出靠近圆周的偏差较大，靠近圆心位置偏差较小。

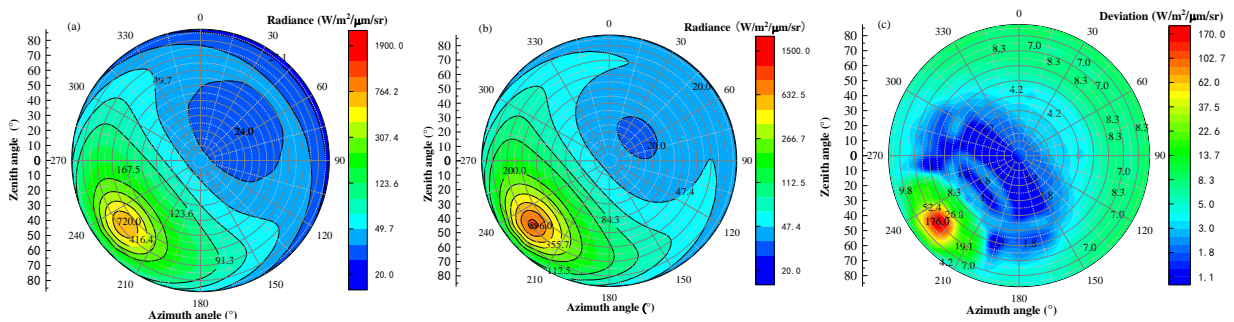


图 3-14 大气散射辐射亮度分布情况 (a) libRadtran-0 km (b) SBDART-0 km (c) 偏差

Fig. 3-14 Atmospheric scattered radiance distribution (a) libRadtran-0 km (b) SBDART-0 km (c) Deviation

图 3-15 (a) 和 (b) 分别对应 libRadtran 模式和 SBDART 模式的亮度，图 3-15 (c) 则为两者的大气散射辐射亮度直接偏差分布。可以看出，在 3 km 高度层上，SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度在太阳位置达到最大值，约为  $1905 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ ，由 libRadtran 模式所计算的大气散射辐射亮度最大值略小于 SBDART 模式，约为  $1465 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。当高度升高到 3 km，由于云层的出现，3 km 高度层中气溶胶含量高，进而大气散射辐射亮度在 3 km 高度层上达到最大，最亮处依旧在太阳所在位置。图 3-15 (c) 中呈现出两个模式计算的大气散射辐射亮度的最大偏差在太阳位置处达到最大为  $440 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。3 km 高度层上两个模式运算的大气散射辐射亮度的偏差大于地面高度的最大偏差，且在观测天顶角较大的方向上两个模式间的偏差较大。

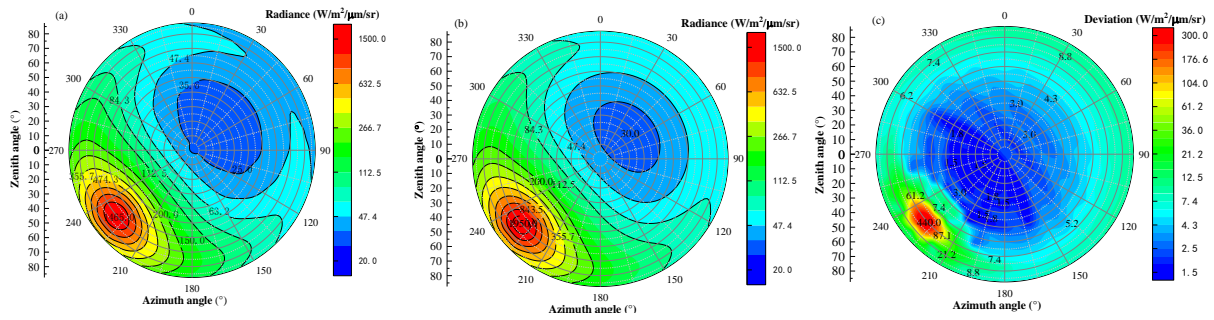


图 3-15 大气散射辐射亮度分布情况 (a) libRadtran-3 km (b) SBDART-3 km (c) 偏差

Fig. 3-15 Atmospheric scattered radiance distribution (a) libRadtran-3 km (b) SBDART-3 km (c) Deviation

图 3-16 给出了 6 km 高度层上的大气散射辐射亮度分布结果和比较。图 3-16(a)-(b) 分别对应 libRadtran 模式和 SBDART 模式的亮度，图 (c) 则为两者的大气散射辐射亮度直接偏差分布。可以看出，在 6 km 高度层上，SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度在太阳所在偏向地平线的位置达到最大值，约为  $520 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ ，由 libRadtran 模式所计算的大气散射辐射亮度最大值略小于 SBDART 模式，约为  $422 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。这是因为当高度升高到 6 km，大气中气溶胶含量相较于 3 km 云层高度和地面高度更少，进而对大气散射辐射亮度更低，而大气瑞利散射作用增强，最亮的位置因此从太阳位置向地平线扩散。图 3-16 (c) 中呈现出两个模式计算的大气散射辐射亮度的最大偏差为  $98 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。6 km 高度层上两个模式运算的大气散射辐射亮度的偏差小于 3 km 云层高度以及地面高度模式间偏差。

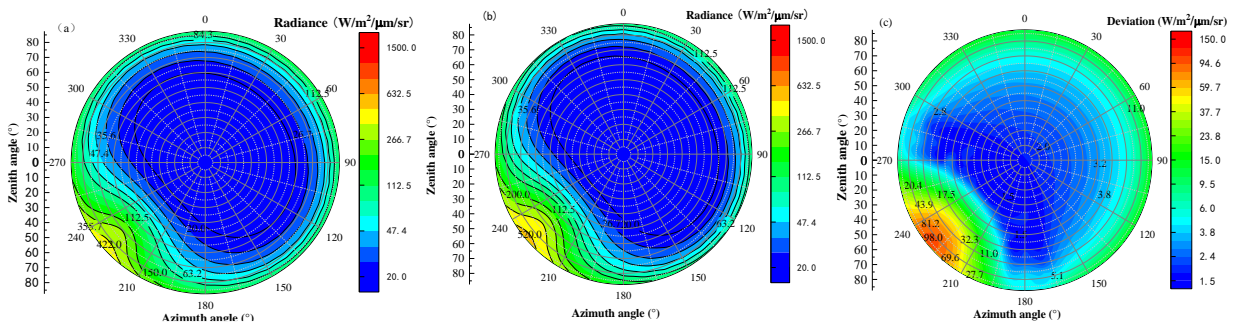


图 3-16 大气散射辐射亮度分布情况 (a) libRadtran-8 km (b) SBDART-8 km (c) 偏差

Fig. 3-16 Atmospheric scattered radiance distribution (a) libRadtran-8 km (b) SBDART-8 km (c) Deviation

在云层天气条件下，从地面位置随着高度的升高，两个模式模拟得到的大气散射辐射亮度的最大值在增大且在云层处达到最大。在云层上方的高度层中，随着高度的升高模式间的偏差在逐渐减小。由偏差图圆周位置处可反应出两个模式间的偏差在天顶角较大的方向上较大，并且随着高度的升高呈现出由地面上升到云层高度处偏差在增大，云层以上高度偏差随高度的增加呈现减小的趋势。

此外，本文对不同观测天顶角方向上大气散射辐射亮度分布做了对比分析。这里以方位角为  $270^\circ$  方向为例。在不同观测天顶角方向上，大气散射辐射亮度均会随着距离的增加而减小。图 3-17 呈现了在不同的观测天顶角的条件下，大气散射辐射亮度随高度

分布的情况。图中分别对应  $85^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $30^\circ$  观测天顶角下的结果。

图 3-17 (a)-(b) 分别为  $85^\circ$  和  $80^\circ$  方向上大气散射辐射亮度对高度的变化曲线，可以看出，SBDART 模式模拟得到的大气散射辐射亮度要高于 libRadtran 模式的结果，特别是在云层高度层上，两个模式运算结果的偏差最大达到  $30 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$  左右，这是由于在云层高度处，气溶胶聚集，光学厚度增大，使得在不同辐射传输模型下的大气散射辐射亮度的差异较大。随着输出高度的升高，两个模式运算的大气散射辐射亮度的偏差逐渐减小，分布趋势逐渐一致。图 3-17 (c) 为观测天顶角为  $45^\circ$  时，大气散射辐射亮度对高度的变化曲线，可以得到该方向上两模式间大气散射辐射亮度的最大偏差减小到  $8 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$  以内，并且两模式所运算的大气散射辐射亮度曲线接近一致。随着天顶角的降低，两个模式模拟的结果如图 3-17 (d) 所示，当天顶角为  $30^\circ$  时，此时两个模式模拟得到的大气散射辐射亮度结果的最大偏差较小，仅约为  $5.9 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。

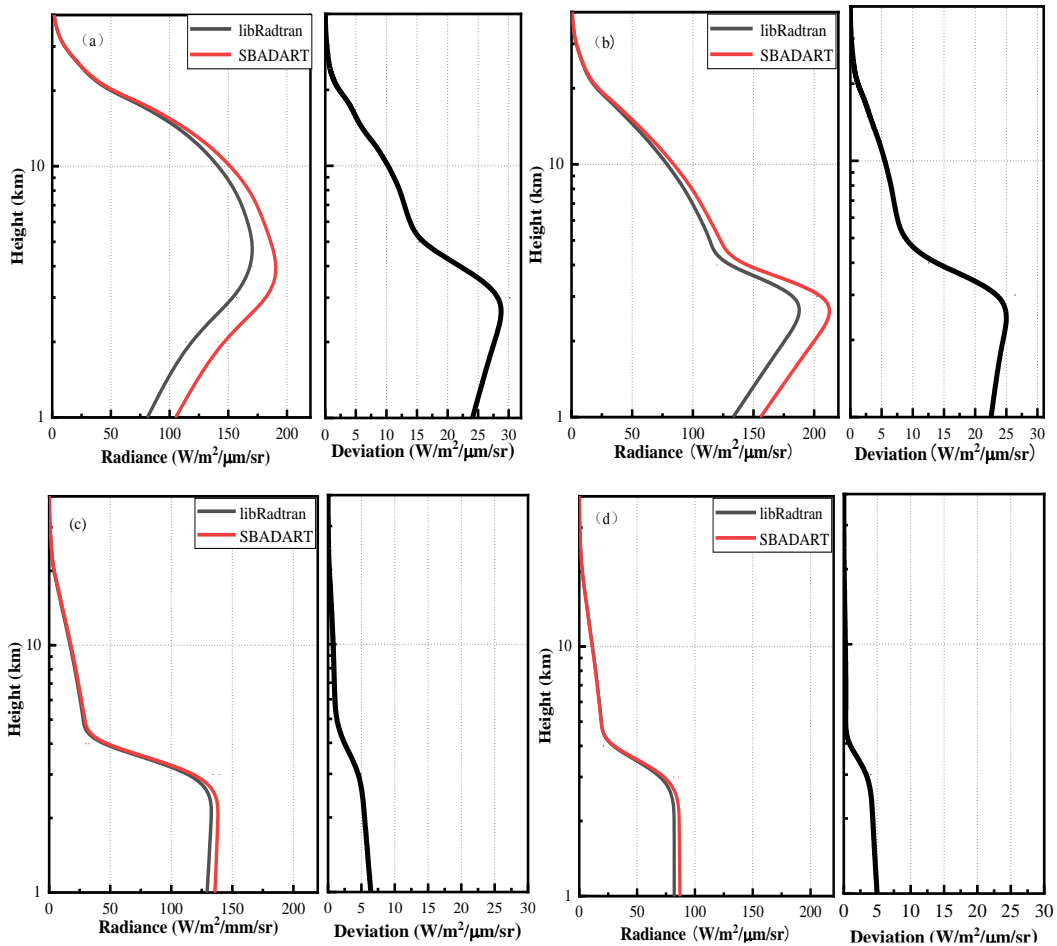


图3-17 两种模式指定方向大气散射辐射亮度随高度分布情况

(a)  $85^\circ$  (b)  $80^\circ$  (c)  $45^\circ$  (d)  $30^\circ$

Fig. 3-17 Distribution of scattered radiance with height in direction of two models

(a)  $85^\circ$  (b)  $80^\circ$  (c)  $35^\circ$  (d)  $30^\circ$

为了更清晰表示不同天顶方向上两个模式模拟结果的差异，我们在  $0-90^\circ$  观测天顶角范围内，以  $5^\circ$  为步长，以 libRadtran 模式模拟结果作为真值，获得两个模式下大气散射辐射亮度的偏差随观测天顶角的变化分布趋势，结果如图 3-18 所示，可以看出：针对

不同的观测天顶角方向，各个高度层上模拟得到的亮度偏差随着观测天顶角方向的增加而增大；在观测天顶角低于  $25^\circ$  时，各个高度层上模拟得到的亮度偏差较小；当观测天顶角增大到  $65^\circ$  及以上时，两个模式间的偏差急剧增加，最大值达到  $30 \text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$  左右。针对于不同高度层上，在地面高度层和云层高度层处，SBDART 模式和 libRadtran 模式模拟的亮度偏差要明显大于其他高度层的结果。因为平行平面大气模型高估了较大的观测天顶角方向上的光学厚度分布，随着观测天顶角的变大，根据两个不同辐射传输模式计算得到的大气散射辐射亮度之间的偏差在较低的高度上比在较高的高度上更明显。

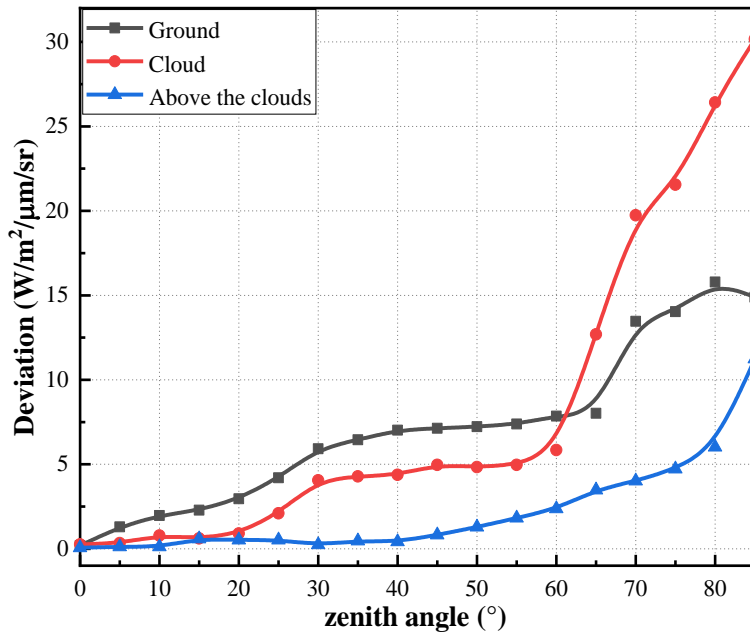


图 3-18 云层天气下模式散射辐射亮度的偏差随观测天顶角的变化

Fig. 3-18 Deviation of the scattered radiance varies with the observation zenith angle under cloudy condition

### 3.4 本章小结

本章首先完成了 SBDART 模式和 libRadtran 模式间参数上进行了统一设置。在此基础上，分别利用 SBDART 模式和 libRadtran 模式重点探讨不同高度层的大气散射辐射亮度分布、不同方向的大气散射辐射亮度分布以及到达地面的太阳直接和散射辐射亮度在两个辐射传输模式下的输出结果，并对结果进行分析。得出以下结论：(1) 晴天天气条件下，SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度分布在地面高度上太阳的位置上达到最大值且大于 libRadtran 模式计算的结果。云层天气条件下，模式所计算的大气散射辐射亮度在云层高度层上太阳位置处达到最大值。(2) 针对于不同高度层上，以伪球形大气模型 libRadtran 模式运算结果作为真值，在地面高度层和云层高度层处，SBDART 模式模拟的亮度与真值的偏差要明显大于其他高度层处的结果。在以上模拟的结果中，明确得到在较大的观测天顶角下两个模式间的计算差异，模拟得到的两个模式在大天顶角方向下的散射辐射亮度的趋势差异，为后续开展大气散射辐射亮度的校正和实现提供依据，以满足对于该方向上实际大气的观测需要。

## 4 大气散射辐射亮度校正方法的仿真与分析

### 4.1 引言

从上一章的仿真对比发现，在大天顶角方向上，利用平行平面大气的 SBDART 模式和利用伪球形大气的 libRadtran 模式模拟的大气散射辐射亮度具有较大差异。如何校正基于 SBDART 模式的大气散射辐射亮度结果呢？在本章中，首先从平行平面和伪球形大气辐射传输方程出发，分析了两者的差异，提出了伪球形校正理论，引入了校正函数-查普曼函数，并对大气校正系数和大气校正过程进行了仿真模拟。进而，在不同天气条件下，利用查普曼函数对 SBDART 模式模拟的大气散射辐射亮度进行校正仿真和结果分析。

### 4.2 基于 libRadtran 的伪球形校正方法

与其他辐射传输模式相比，SBDART 模式不仅具有高计算精度、灵活性和可扩展性，还拥有用户友好性和可视化界面等优势。在目前现有的斜程能见度测量方法中就利用了 SBDART 模式进行大气散射辐射亮度的模拟。但是，SBDART 模式是基于平行平面大气模型的辐射传输模式，在较大观测天顶角方向上，基于平行平面的 SBDART 模式存在过量估计观测方向上光学厚度的影响，导致斜程路径上的大气散射辐射亮度要高于实际值。因此，需要对较大天顶角方向上 SBDART 模式模拟的大气散射辐射亮度进行校正。水平均匀假设的平行平面大气是指在大气层中气压、温度、湿度等参数均匀且在水平方向上不变的理想气体层。这种模型基于以下假设：

(1) 气体是连续的：假定大气是由连续的气体构成的，即在任何一个空间点，大气中都有气体分子存在，并且它们的物理状态可以被描述为对应于一定温度、压力和密度的气体状态方程。在这个假设下，小到气溶胶、云滴等都被视为与气体相连续的一部分。

(2) 水平方向上的平均性：假定在任何一个时刻，大气的物理量（如温度、湿度、气压等）在水平方向上是均匀的。这个假设在大气模型的计算中是非常常用的，它简化了实际大气的描述，允许直接对水平方向上的变量进行积分，使得模型的计算更具可行性和高效性。

水平均匀假设的平行平面大气是大气模型分类和应用的基础假设之一，伪球形大气模型和球形大气模型等都是基于这种假设的扩展和变形。伪球形大气模型是一种将地球大气看作是球形对称的假设模型。在这种模型中，大气层被假设为由一系列的球形层组成，每个球形层具有相同的物理特性。早在 1990 年 A.dahlback 等人在日落前后在辐射传输的计算结果过程中，证实了大气几何模型的选取的重要性。为了获得准确的平均亮度强度及辐射亮度值，需要对适用于球形大气的辐射传输方程进行求解。对于太阳天顶角小于  $90^\circ$  的情况，使用伪球形球面几何模型计算辐射亮度的衰减为符合实际大气的最佳选项。这种模型的优点是可以简化计算，并考虑了实际大气的几何形状，相比于平行平



面大气模型使用伪球形大气模型更贴合实际大气情况。图 4-1 呈现了两种大气模型的几何示意图。

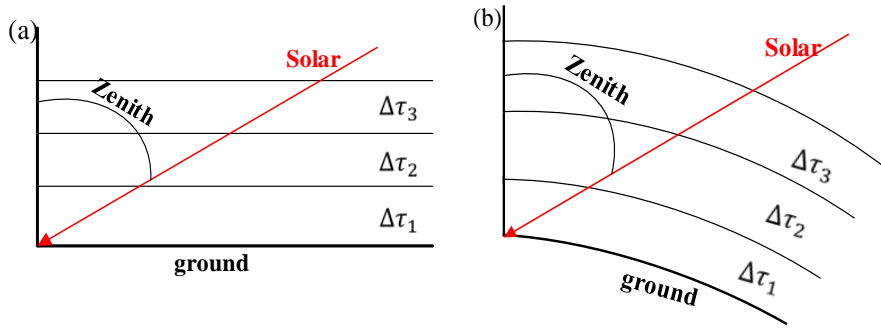


图 4-1 不同大气几何模型示意图 (a) 平行平面 (b) 伪球形

Fig. 4-1 Schematic diagram of different atmospheric geometric models (a) Parallel plane (b) PseudoSpherical

一维平行平面大气的辐射传输方程满足以下方程：

$$\begin{aligned}
 -\mu \frac{dI(\tau, \mu, \phi)}{d\tau} = & I(\tau, \mu, \phi) \\
 & - \frac{\omega(\tau)}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi' \int_{-1}^1 d\mu' p(z, \mu, \phi; \mu', \phi') I(\tau, \mu', \phi) \\
 & - (1 - \omega(\tau)) B[T(\tau)] \\
 & - \frac{\omega(\tau) I^0}{4\pi} p(z, \mu, \phi; \mu_0, \phi_0) e^{-\tau/\mu_0}.
 \end{aligned} \tag{4-1}$$

在伪球形近似理论中，大气辐射传输方程描述为：

$$\begin{aligned}
 -\mu \frac{dI(\tau, \mu, \phi)}{d\tau} = & I(\tau, \mu, \phi) \\
 & - \frac{\omega(\tau)}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\phi' \int_{-1}^1 d\mu' p(z, \mu, \phi; \mu', \phi') I(\tau, \mu', \phi) \\
 & - (1 - \omega(\tau)) B[T(\tau)] \\
 & - \frac{\omega(\tau) I^0}{4\pi} p(z, \mu, \phi; \mu_0, \phi_0) e^{-ch(\tau, \mu_0)}.
 \end{aligned} \tag{4-2}$$

其中查普曼函数  $ch(r, \mu_0)$  描述了球面大气中的消光路径，定义为：

$$ch(r, \mu_0) = \int_{r_0}^{\infty} \frac{\beta^{ext}(r, \nu) dr}{\sqrt{1 - \left(\frac{R+r_0}{R+r}\right)^2 (1 - \mu_0^2)}} \tag{4-3}$$

其中  $\beta^{ext}$  为气溶胶消光系数， $R$  为地球半径，大约是 6371.393 km， $r_0$  为大气层表面上方距离，假设为 100 km， $\mu_0$  为天顶角的余弦值， $\nu$  为光子频率。可见，方程(4-1)中的大气消光路径  $\tau / \mu_0$  被查普曼函数  $ch(r, \mu_0)$  代替，这也正是两个模型的差异所在。经校正后的大气散射辐射亮度应描述为：

$$D' = D \cdot e^{-ch(r, \mu_0)} \quad (4-4)$$

其中  $D$  为由 SBDART 模式模拟得到不同高度层上的大气散射辐射亮度,  $D'$  为经查普曼函数校正后的大气散射辐射亮度。将查普曼函数看为一个随光线传输距离而变化的系数, 定义为校正系数  $C$ , 那么式(4-4)就可以写:

$$D' = D \cdot C(r, \mu_0) \quad (4-5)$$

因此, 只要已知斜程方向上的气溶胶消光系数廓线, 就可以利用查普曼函数计算得到该方向的校正系数  $C$ , 进而对大气散射辐射亮度进行校正。图 4-2 给出了伪球形大气校正仿真实现的步骤。

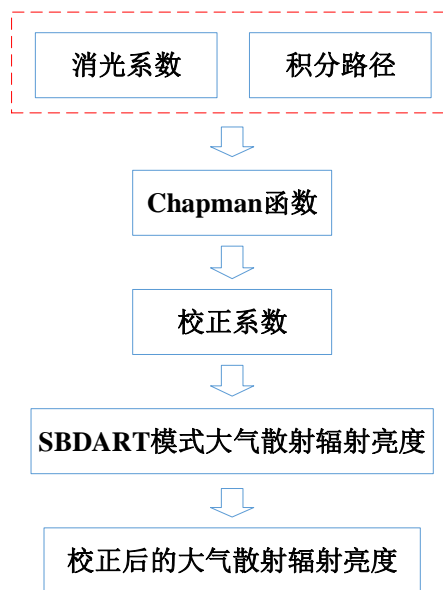


图 4-2 伪球形大气校正仿真过程示意图

Fig. 4-2 Pseudo spherical atmospheric correction simulation process diagram

### 4.3 查普曼函数校正的仿真与实现

大气气溶胶消光系数  $\beta$  和积分方向上的距离  $r$  是查普曼函数校正中的两个重要因素。接下来分别从气溶胶消光系数和被积分方向这两个方面进行仿真, 讨论它们对于查普曼函数校正的影响。

#### 4.3.1 不同方向上的查普曼函数校正仿真

首先, 讨论在不同观测天顶角方向上的校正系数变化趋势。平行平面大气模型满足水平均匀假设, 在同一高度上, 大气气溶胶消光系数一致。但是, 不同的观测方向上的气溶胶消光系数分布趋势则不同, 由此带来校正系数也会呈现出不同的校正效果如图 4-3 所示。其中图 4-3 (a) 为一条气溶胶消光系数廓线, 地面处的气溶胶消光系数约为  $0.22 \text{ km}^{-1}$ , 地面处水平能见度约为  $17.7 \text{ km}$ 。4-3 (b) 为不同观测方向上的校正系数随高度的变化曲线, 分别给出了在相同的垂直气溶胶消光系数廓线作用下, 观测天顶角以  $5^\circ$  为间

隔, 从  $40^\circ$  增大到  $85^\circ$  的校正曲线结果。

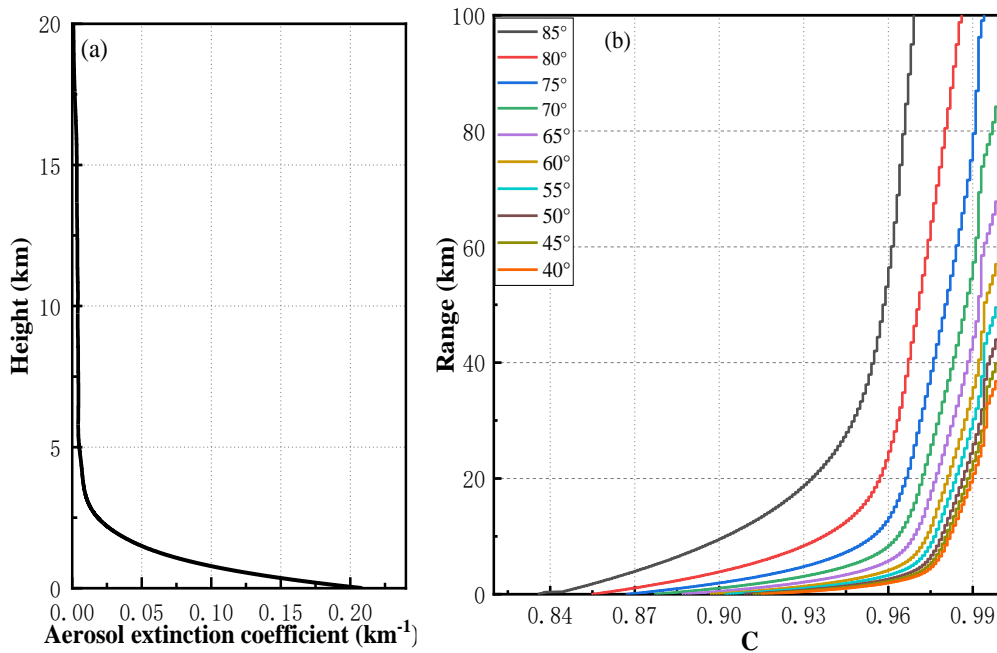


图 4-3 垂直气溶胶消光系数和不同观测方向上校正系数随距离的分布

(a) 垂直气溶胶消光系数 (b) 不同方向上查普曼校正系数

Fig. 4-3 Vertical aerosol extinction coefficient and distribution of calibration coefficient with distance in different observation directions

(a) Aerosol extinction coefficient (b) Calibration coefficients in different directions

在同一条气溶胶消光系数廓线条件下, 由于观测方向的差异, 体现在校正系数上的差异较为明显。在较大的观测天顶角方向上, 校正系数较小且随距离衰减较为剧烈。如图 4-3 (b) 中黑线所示, 在  $85^\circ$  观测天顶角方向上, 地面处校正系数为 0.836, 在 0 到 20 km 的距离上, 校正系数为的增大到 0.945, 校正能力在减弱, 在 20 km 以上的距离中, 校正系数随着距离的增加而升高, 反映出校正能力随着高度的升高而减弱。而在较小的观测天顶角方向上, 如图 4-3 (b) 中橙线所示, 地面处校正系数较小为 0.915, 且随着距离的升高, 校正系数迅速增大, 反映出随着高度增加, 校正能力快速下降。

通过较大和较小观测天顶角方向上的校正系数曲线的对比可认为: 在较小观测天顶角的方向上, 可近似忽略平行平面大气辐射传输模式与伪球形大气辐射传输模式对于大气光学厚度分布带来的差异, 但是在较大的观测天顶角的方向上, 需利用校正函数对平面平行大气模型进行校正, 消除由大气气溶胶消光系数引起的光学厚度差异, 这样才能获得伪球形近似的辐射传输模拟。

#### 4.3.2 不同气溶胶消光系数的查普曼函数校正仿真

进而, 讨论不同气溶胶消光系数对校正系数的影响。气溶胶消光系数是描述大气中气溶胶例子对光的吸收和散射能力的物理量之一。较大的气溶胶消光系数意味着大气对光的吸收和散射作用更强。而较小的气溶胶消光系数意味着相同的光线在大气中传播的

损失更少。

图 4-4 给出了为四组不同的气溶胶消光系数垂直廓线，分别对应于不同能见度下晴天天气情况，水平能见度分别为 30 km，23 km，15 km 和 9 km。选择在  $85^\circ$  的观测天顶角方向上进行路径积分，得到如图 4-5 所示的校正系数随距离的变化结果分布。当气溶胶消光系数较大时，被积分项的值相对较大，从而使查普曼函数校正系数较大，其校正能力也就相应较强。

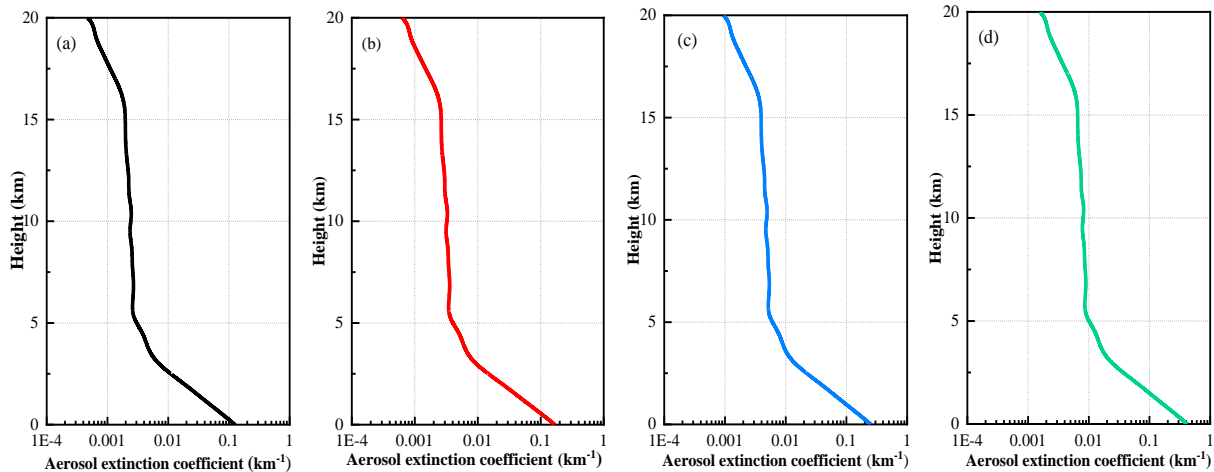


图 4-4 不同水平能见度下的气溶胶消光系数廓线 (a) 30 km (b) 23 km (c) 15 km (d) 9 km

Fig 4-4 Aerosol extinction coefficient profiles for different visibility (a) 30 km (b) 23km (c) 15 km (d) 9 km

使用不同的气溶胶消光系数曲线，同时选择在  $85^\circ$  的观测天顶角方向上对公式(4-3)分别进行积分，得到不同气溶胶消光系数的校正系数曲线如图 4-5 所示，图中绿线、蓝线、红线和黑线分别对应图 4-4 中的气溶胶消光系数廓线得到的校正曲线。可以看出，较大的气溶胶消光系数廓线对应的校正曲线衰减程度较高，如绿线所示，在地面处的校正值为 0.76，并且在 0 km 到 40 km 左右的距离上呈现出较快的衰减趋势，从 40 km 到 330 km 左右的观测距离上缓慢衰减至 1，但衰减程度大于其余三组校正系数。而较小气溶胶消光系数对应校正系数曲线，如图 4-4 中的黑线，在地面处的校正值为 0.925，并且在 0 km 到 20 km 左右的距离上呈现出较快的衰减趋势，从 20 km 到 330 km 左右的观测距离上缓慢衰减至 1，但衰减程度小于其余三组校正系数。

可以看出，较大的气溶胶消光系数，校正系数的校正能力越强。相反，当气溶胶消光系数比较小时，大气对于光线的影响就相对较小，校正系数的校正能力也会相应减弱。方向上的距离  $r$  也是对查普曼函数校正系数影响的重要因素。方向上的距离  $r$  越大，意味着光线穿过大气的距离越长，光线强度的损失也就越大。可见，在不同的能见度天气条件下气溶胶消光系数特性对相同观测方向上的大气散射辐射亮度有着不同程度的校正效果。

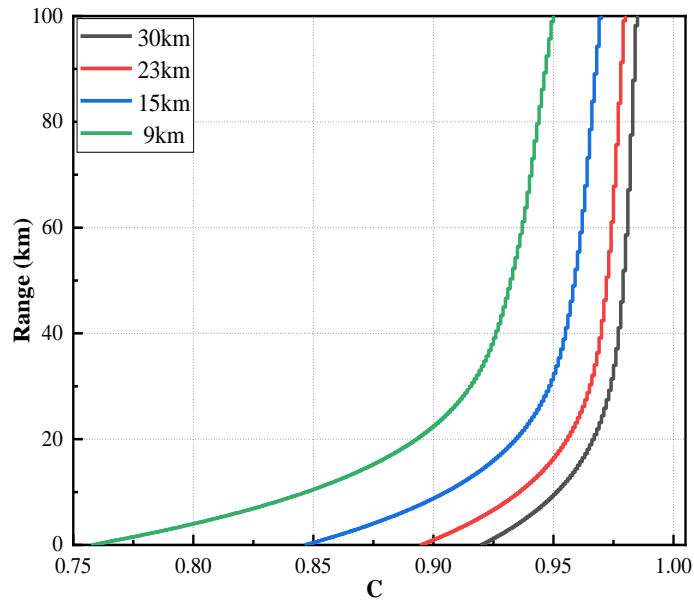


图 4-5 85° 方向四组气溶胶消光系数下的校正系数曲线

Fig. 4-5 The correction coefficient of four aerosol extinction coefficients in the direction of 85°

可以看出，较大的气溶胶消光系数，校正系数的校正能力越强。相反，当气溶胶消光系数比较小时，大气对于光线的影响就相对较小，校正系数的校正能力也会相应减弱。方向上的距离 $r$ 也是对查普曼函数校正系数影响的重要因素。方向上的距离 $r$ 越大，意味着光线穿过大气的距离越长，光线强度的损失也就越大。可见，在不同能见度的天气条件下气溶胶消光系数特性对相同观测方向上的大气散射辐射亮度有着不同程度的校正效果。

#### 4.4 利用伪球形校正方法对 SBDART 模式大气散射辐射亮度的校正仿真

##### 4.4.1 晴空天气条件下大气散射辐射亮度的校正的仿真与分析

libRadtran 模式使用伪球形大气模型作为大气几何模型，其计算结果更贴近于实际大气下的结果。接下来，基于 libRadtran 模式对 SBDART 模式模拟的晴空天气条件下大气散射辐射亮度进行校正仿真与分析，分别选取较大观测天顶角和较小的观测天顶角为例进行说明。从图 4-6 (a)所示的气溶胶消光系数廓线上，该观测方向上的气溶胶消光系数随着距离缓慢衰减；在该观测方向上经查普曼函数积分后得到了校正系数曲线，从大气层顶到地面，校正系数从 1 下降为 0.93 左右，如图 4-6 (b)所示。通过 SBDART 模式模拟的大气散射辐射亮度与校正系数相乘后，即得到校正后的大气散射辐射亮度分布曲线，如图 4-6 (c)所示。为了表示校正前后的对比，图中同时展示了校正前和校正后的大气散射辐射亮度曲线，以及利用伪球形大气模型的 libRadtran 模式模拟的该方向上大气散射辐射亮度结果作为真值。在地面处，校正前 SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度为 146  $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}$  左右，经校正系数校正后减小到 135.2  $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}$  左右，校正前后相对于 libRadtran 模式的偏差从 24.5  $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}$  减小到 13.7  $\text{W}/\text{m}^2/\mu\text{m}/\text{sr}$  左右，并且随着高度的升高，校正后的大气散射辐射亮度更贴近使用伪球形大气模型计算的结果。

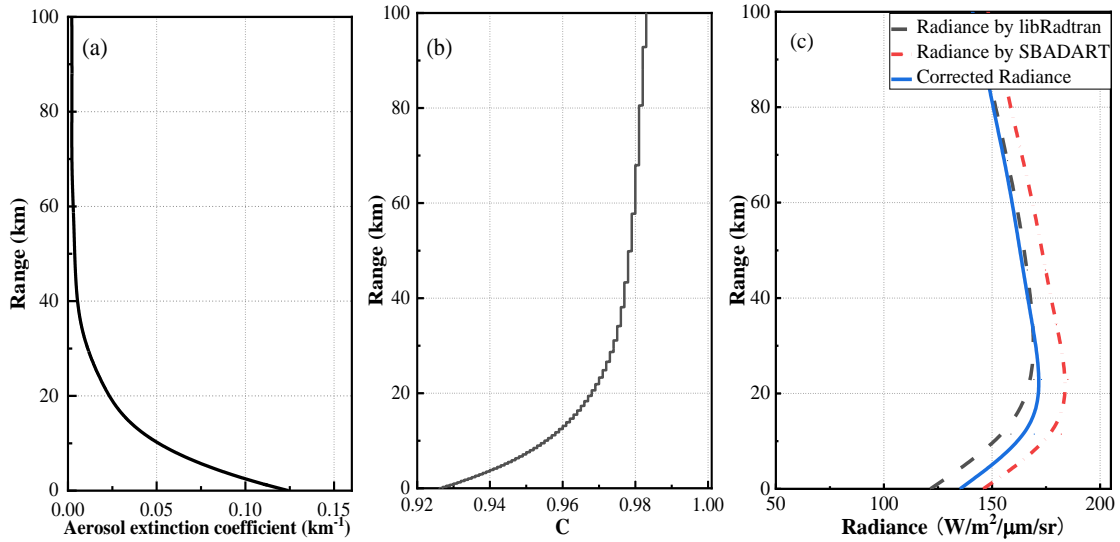


图 4-6 晴空条件 85° 观测天顶角方向上气溶胶消光系数、校正系数和校正亮度

(a) 气溶胶消光系数 (b) 校正系数 (c) 校正亮度

Fig. 4-6 Aerosol extinction coefficient, calibration coefficient and corrected radiance at 50 ° observation zenith angle under clear condition

(a) Aerosol extinction coefficient (b) Calibration coefficient (c) Corrected radiance

图 4-7 (a)为晴空大气条件下 80° 观测天顶角方向上气溶胶消光系数随距离的特性曲线。在该观测方向上经查普曼函数积分后得到校正系数曲线 C，如图 4-7 (b)，经校正后得到的大气散射辐射亮度曲线如图 4-7 (c)所示。在该方向上，校正前在地面处的大气散射辐射亮度为 170 W/m<sup>2</sup>/μm/sr 左右，经校正后减小到 156 W/m<sup>2</sup>/μm/sr 左右；与 libRadtran 模式的结果进行比较，偏差从 28.3 W/m<sup>2</sup>/μm/sr 减小到 14.3 W/m<sup>2</sup>/μm/sr 左右；并且随着高度的升高，校正后的大气散射辐射亮度更贴近使用伪球形大气模型计算结果。

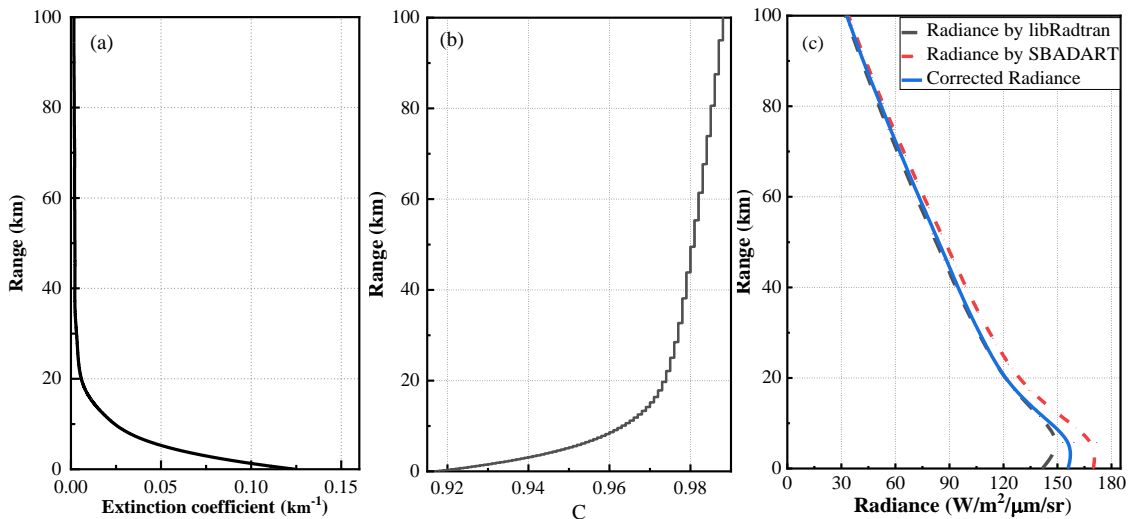


图 4-7 晴空条件下 80° 观测天顶角方向上气溶胶消光系数、校正系数和校正亮度

(a) 气溶胶消光系数 (b) 校正系数 (c) 校正亮度

Fig. 4-7 Aerosol extinction coefficient, calibration coefficient and corrected radiance at 80 ° observation zenith angle under cloudy condition

(a) Aerosol extinction coefficient (b) Calibration coefficient (c) Corrected radiance

图 4-8 (a)为晴空大气条件下  $30^\circ$  观测天顶角方向上气溶胶消光系数随距离分布的特性曲线。在该观测方向上经查普曼函数积分后得到校正系数曲线如图 4-8 (b)，在地面处的校正系数约为 0.95，反映出较弱的校正能力。校正后的校正后的大气散射辐射亮度分布曲线如图 4-8 (c)所示，在 20 km 以下，校正前后的大气散射辐射亮度曲线分布趋势一致且直接偏差较小。

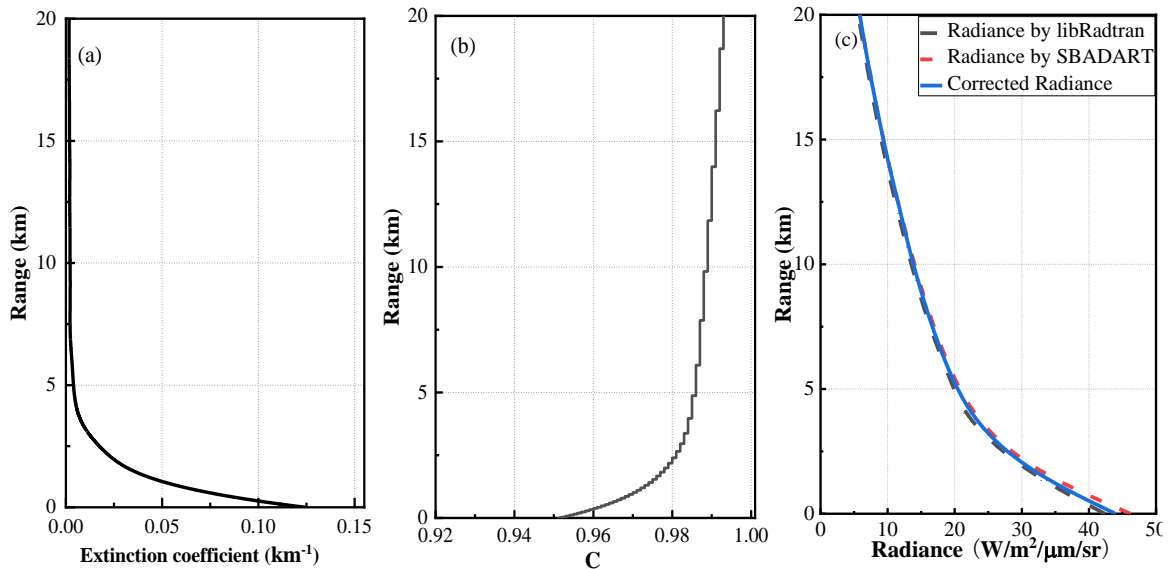


图 4-8 晴空条件下  $30^\circ$  观测天顶角方向上气溶胶消光系数、校正系数和校正亮度  
(a) 气溶胶消光系数 (b) 校正系数 (c) 校正亮度

Fig. 4-8 Extinction coefficient, calibration coefficient and corrected radiance at  $30^\circ$  observation zenith angle under clear condition

(a) Aerosol extinction coefficient (b) Calibration coefficient (c) Corrected radiance

综上所述，气溶胶消光系数对于校正系数的校正能力影响较大，晴空大气条件下地面处气溶胶消光系数较大，因此较大观测天顶角方向上，校正系数在地面处的校正能力较强，且随着高度的升高，两个模式间的差异在减小，校正程度也在随着高度的升高而减小。从大气散射辐射亮度分布趋势上看，校正后的结果与 libRadtran 模式结果吻合。

#### 4.4.2 云层天气条件下大气散射辐射亮度的校正的仿真与分析

图 4-9 (a)为云层大气条件下  $85^\circ$  观测天顶角方向上气溶胶消光系数随距离的特性曲线。在该观测方向上经 chapman 函数积分后得到校正系数曲线如图 4-9 (b)。在得到校正系数 C 的分布后，与 SBDART 模式在  $85^\circ$  天顶角观测方向上的大气散射辐射亮度曲线相乘后得到校正后的大气散射辐射亮度分布曲线，并与校正前及使用伪球形大气模型的 libRadtran 模式所运算的大气散射辐射亮度进行对比，得到校正前后 20km 以下的相对误差变化情况，如图 4-9 (c)所示。

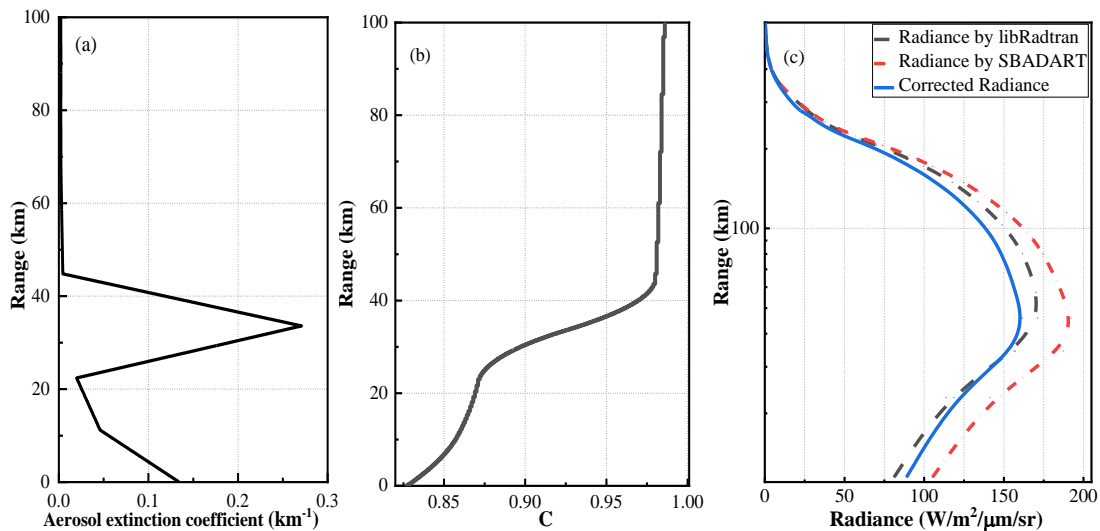


图 4-9 云层条件下 85° 观测天顶角方向上气溶胶消光系数、校正系数和校正亮度

(a) 气溶胶消光系数 (b) 校正系数 (c) 校正亮度

Fig. 4-9 Aerosol extinction coefficient, calibration coefficient and corrected radiance at 80° observation zenith angle under cloudy condition

(a) Aerosol extinction coefficient (b) Calibration coefficient (c) Corrected radiance

在云层天气条件下，较大的观测天顶角方向上，SBDART 辐射传输模式输出的大气散射辐射亮度经校正系数校正后，在地面附近和云层高度的大气散射辐射亮度上呈现出较好的校正结果。在地面处校正前 SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度为 70.3  $W/m^2/\mu m/sr$  左右，经校正系数校正后减小到 58.2  $W/m^2/\mu m/sr$  左右，校正前后的亮度相对于 libRadtran 模式的偏差从 14.9  $W/m^2/\mu m/sr$  减小到 2.8  $W/m^2/\mu m/sr$  左右，在云层高度处校正前 SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度为 192.2  $W/m^2/\mu m/sr$  左右，经校正系数校正后减小到 161.7  $W/m^2/\mu m/sr$  左右，校正前后相对于 libRadtran 模式的偏差从 21  $W/m^2/\mu m/sr$  减小到 9.5  $W/m^2/\mu m/sr$  左右。由于云层处的气溶胶消光系数相对于其他高度很大，在云层处的校正能力也最强，导致在云层及以上高度出现了一定的过校正现象。随着高度的升高，校正后的大气散射辐射亮度更贴近 libRadtran 模式计算的结果。

图 4-10 (a)为云层大气条件下 80° 观测天顶角方向上气溶胶消光系数随距离分布的特性曲线。在该观测方向上经查普曼函数积分后得到校正系数曲线 C 如图 4-10(b)。得到校正系数后，进而可得到校正后的大气散射辐射亮度分布曲线，与校正前及 libRadtran 模式模拟的大气散射辐射亮度进行对比，如图 4-10 (c)所示。以 libRadtran 模式计算结果作为真值，在地面处校正前 SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度为 101.1  $W/m^2/\mu m/sr$  左右，经校正系数校正后减小到 86.2  $W/m^2/\mu m/sr$  左右，校正前后的亮度相对于 libRadtran 模式的偏差从 15.8  $W/m^2/\mu m/sr$  减小到 1  $W/m^2/\mu m/sr$  左右；在云层高度处校正前 SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度为 228.6  $W/m^2/\mu m/sr$  左右，经校正系数校正后减小到 198.8  $W/m^2/\mu m/sr$  左右，校正前后相对于 libRadtran 模式的偏差从 26.4  $W/m^2/\mu m/sr$  减小到 3.4  $W/m^2/\mu m/sr$  左右。同样从趋势上看，随着高度的升高校正后的大气散射辐射亮度更贴近使用伪球形大气模型计算的结果。



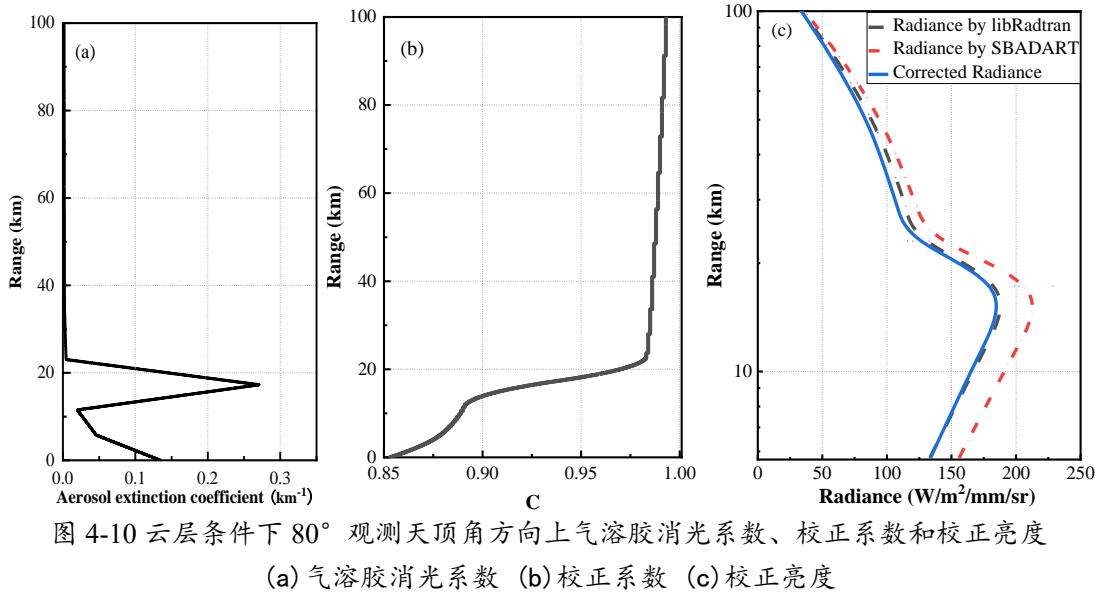


Fig. 4-10 Aerosol extinction coefficient, calibration coefficient and corrected radiance at 80 ° observation zenith angle under cloudy condition  
 (a) Aerosol extinction coefficient (b) Calibration coefficient (c) Corrected radiance

图 4-11(a)为云层天气条件下 30° 观测天顶角方向上气溶胶消光系数随距离分布的特性曲线。在该观测方向上经查普曼函数积分后得到校正系数曲线如图 4-11 (b)。校正后的大气散射辐射亮度分布曲线如图 4-11 (c)所示，图中同时给出了 SBDART 模式校正前后及 libRadtran 模式模拟的大气散射辐射亮度结果。可以看出，在云层天气下，在较小的观测天顶角方向上，不同大气散射辐射亮度差异较小，曲线分布趋势近似一致，地面处 SBDART 模式校正前为 85.9 W/m<sup>2</sup>/μm/sr，校正后为 83.1 W/m<sup>2</sup>/μm/sr，偏差从 5.8 W/m<sup>2</sup>/μm/sr 减小到 3 W/m<sup>2</sup>/μm/sr 左右。因此，在较小的观测天顶角方向上校正能力很弱。

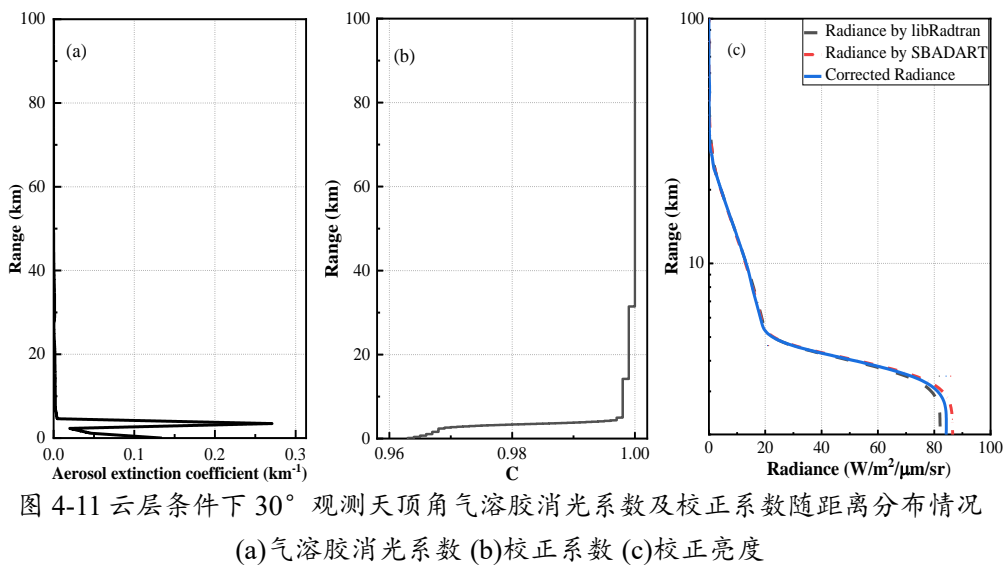


Fig. 4-11 Aerosol extinction coefficient, calibration coefficient and corrected radiance at 30 ° observation zenith angle under cloudy condition  
 (a) Aerosol extinction coefficient (b) Calibration coefficient (c) Corrected radiance

综上所述，云层大气条件下地面处和云层高度处气溶胶消光系数较大，因此较大的观测天顶角方向上，校正系数在地面处和云层高度处的校正能力较强。由于云层的出现也会导致云层以上几公里的高度处相较于晴空无云大气呈现出较大的气溶胶消光系数，因此导致云层以上几公里的高度上的对大气散射辐射亮度存在过校正的现象。但经校正后的散射辐射亮度分布整体上趋近于伪球形大气模型 libRadtran 模式计算结果。较小的观测天顶角方向上，校正前后的大气散射辐射亮度无明显变化。

#### 4.5 本章小结

本章基于伪球形校正理论，引入了校正函数—查普曼函数，仿真讨论了大气气溶胶消光系数和观测方向距离对校正系数的影响，气溶胶消光系数越大，校正能力越强；观测方向距离越长，校正程度越高。在此基础上，在不同天气条件下，利用查普曼函数对 SBDART 模式模拟的大气散射辐射亮度进行校正仿真，通过较大的观测天顶角和较小的观测天顶角方向上的仿真结果和分析，可以得到：晴天条件下地面气溶胶消光系数较大，对大天顶角度观测方向的校正能力较强。在云层覆盖下，云层和地面处气溶胶的消光系数都比较大，因此对地面和云层处的校正能力也较强。随着高度升高，校正能力减小。并且结果表明，在较小的观测天顶角方向上，可近似忽略使用平行平面大气模型对于实际大气估计误差的影响，无需做校正；在较大的观测天顶角方向上校正后的 SBDART 模式大气散射辐射亮度更接近伪球形大气模型的计算结果。从校正后的大气散射辐射亮度曲线的趋势上看，更贴合伪球形大气模型 libRadtran 模式的计算结果。



## 5 基于激光雷达和辐射传输模式的斜程能见度的实验与验证

在第四章校正方法仿真实现的基础上，本章将利用激光雷达实测数据开展实际大气条件下大气散射辐射亮度的校正，并将校正结果应用到斜程能见度的测量中。首先，简单介绍本文实验所采用的一套激光雷达系统；接着，利用激光雷达探测实验数据，开展实际大气条件下的大气散射辐射亮度的校正和结果分析；最后，根据斜程能见度的精确反演理论，获得大气散射辐射亮度校正后的斜程能见度测量结果，并将校正前和校正后的斜程能见度结果进行讨论和分析。

### 5.1 斜程能见度激光雷达系统介绍

为了实现实际大气散射辐射亮度的对比，需要输入实际的大气气溶胶数据，而这些数据需基于模式所需进行选择和处理。将获得实时的大气气溶胶数据用作两个模式输入参数之一。通过灵活选择和处理，将气溶胶数据嵌入到 SBDART 模式中以计算不同天气条件下的实际大气散射辐射亮度。

本文采用西安理工大学激光雷达遥感研究中心设计的一台双波长米-拉曼散射激光雷达系统。该系统可分为两部分，由激光发射器、卡塞格林望远镜、三角支撑架和三维控制面板组成的第一部分和由水冷机、高分辨率分光系统、高压控制调节模块和 PC 工控机组成的第二部分。系统实物如图 5-1 所示。

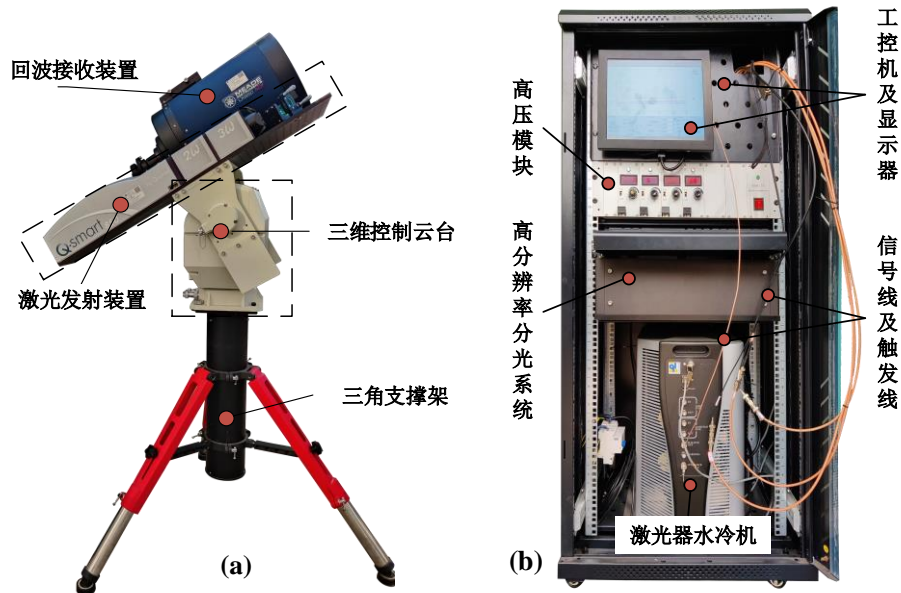


图 5-1 激光雷达系统实物图

(a) 激光雷达探测组件 (b) 激光雷达控制组件

Fig. 5-1 Diagram of the lidar system

(a) lidar detection component (b) lidar control component

该激光发射装置采用了 Nd:YAG 固态激光器，其发射波长为 355 nm 和 1064 nm。该激光发射装置通过两片夹角为 45° 的高阈值反射镜向大气层发射激光。由 Meade 公司生

产的 LX850 卡塞格林望远镜接收大气后向散射回波信号。该望远镜的有效孔径为 254 mm, 视场角为 0.5 mrad, 焦距可达 2032 mm。大气回波信号经耦合系统传入直径约为 1 mm 的多模光纤, 并通过高光谱分辨率分光系统进行精细分光 and 高效提取。355 nm 和 386.7 nm 的回波信号通过光电倍增管实现光电转换, 1064 nm 和 852.7 nm 的信号通过雪崩二极管进行探测。最后, 由采集卡和工控机进行数据采集、反演和分析处理。

该激光雷达系统不同于传统的垂直探测系统, 它具备扫描探测功能。通过控制云台的水平和俯仰运动机构, 实现多角度斜程扫描和水平旋转扫描。垂直扫描范围为 0-90°, 速度区间为 0.01-15° /s, 精度为 0.01°。水平扫描角度为 0-360°, 速度可控制在 0.01-30° /s。系统的扫描探测方式主要有两种: 一种是在固定某一方位角下改变观测天顶角的扇形扫描, 另一种是在固定天顶角下在不同观测方位角方向上进行锥形扫描。此外, 该系统还可按一定角度间隔实现自动连续扫描探测和在某一角度固定进行长时间连续探测。

## 5.2 斜程路径上大气散射辐射亮度的校正与实现

### 5.2.1 晴空条件下大气散射辐射亮度的校正

通过斜程能见度激光雷达系统结合后处理程序反演技术获取气溶胶特性参数列表, 我们可以更准确地描述大气中气溶胶的分布、浓度和光学特性, 从而提高大气辐射传输模拟的精度。这些参数包括气溶胶光学厚度、单次散射反照率、不对称因子和散射相函数等。可将以上参数自定义编写从而构成气溶胶特性参数列表。该列表可用作平行平面大气模型 SBDART 辐射传输模式的实际大气气溶胶特性输入参数列表。

为获得晴空条件下实际大气气溶胶特性参数随高度的变化情况, 在 2022 年 3 月 23 日 16 点 48 分, 于阎良机场利用斜程能见度激光雷达系统开展垂直探测实验, 实验当天天气晴朗。下图 5-2 给出了经激光雷达垂直探测实验反演得到气溶胶散射特性参量廓线分布, 包括光学厚度增量、光学厚度、单次散射反照率和不对称因子。

图 5-2 (a)黑线显示了光学厚度增量随高度变化的趋势。随着高度的升高, 光学厚度增量呈现出减小的趋势, 并在 4 km 以上的高度中, 由于大气分子和气溶胶急剧减少, 光学厚度增量的变化较小。图 5-2 (b)红线为光学厚度随高度的分布趋势, 整层气溶胶光学厚度为 0.47 左右, 气溶胶光学厚度随着高度的升高而逐渐增大, 在 20 km 处达到 0.465, 从 20 km 到 100 km 缓慢增加至 0.47 左右。图 5-2 (c)绿线为单次散射反照率, 用来描述气溶胶粒子在大气中对太阳辐射的散射特性的重要参数。图 5-2 (d)是不对称因子随高度分区曲线, 它描述了气溶胶粒子在散射过程中向前、向后散射光线的分布差异性。在 10 km 以下单次散射反照率和不对称因子整体呈现靠近地面的高度值越大, 说明了气溶胶粒子在越靠近地面的高度越多。在高度 10 km 以上大气气溶胶很少且基本无变化, 单次散射反照率和不对称因子保持在 0.9075 和 0.6714。

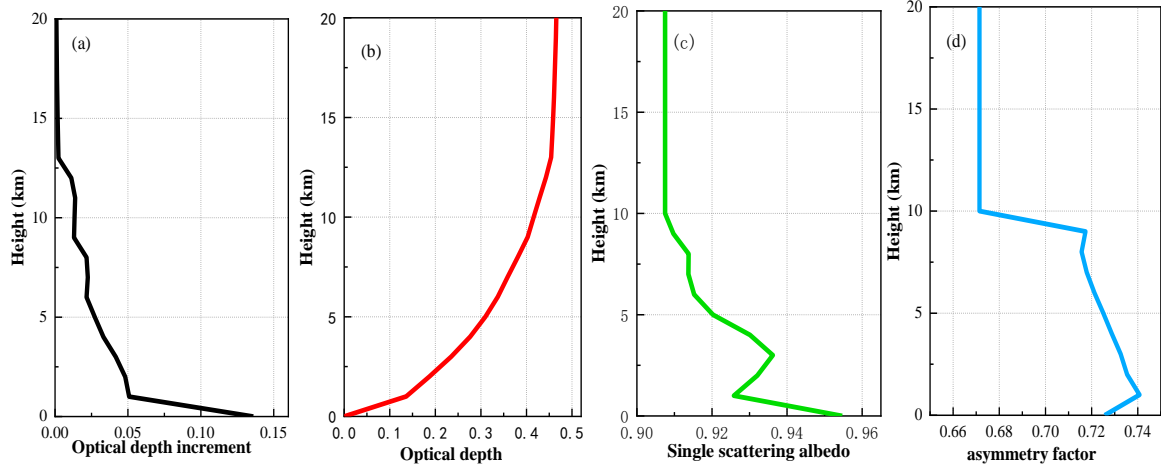


图 5-2 2022 年 3 月 23 日激光雷达探测反演获得气溶胶特性参量廓线

(a) 光学厚度增量 (b) 光学厚度 (c) 单次散射反照率 (d) 不对称因子

Fig. 5-2 The profiles of aerosol parameters by lidar taken on March 23, 2023

(a) Optical depth increment (b) Optical depth (c) Single scattering albedo (d) Asymmetry factor

利用上述垂直探测实验获取的大气光学气溶胶参数廓线，构建一个实际大气气溶胶参数输入列表，作为 SBDART 模式的自定义气溶胶文件 aerosol.dat 文件，作为模式输入参数的一部分并进行运算，经后处理程序数据整理后，得到特定斜程方向上的大气散射辐射亮度随距离的变化曲线。图 5-3 呈现了晴天条件下实际气溶胶特性参数列表文件的具体数据。可看出该文件以 33 个高度层作为数据纵向排列的基础，分别以光学厚度增量、单次散射反照率、不对称因子和 106 阶散射相函数的勒让德矩阵展开作为横向排列形成具有 3630 个参数组成的实际晴天气溶胶特性参数输入文件 aerosol.dat。

Height	Optical depth	SSA	gg	Legendre Matrix (106)									
100	3.27E-14	0.9075	0.6714	0.671	0.45024	0.30211	0.20272	0.13602	0.09127	...	9.5281E-19	6.39269E-19	4.2881E-19
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
8	0.02159	0.91377	0.71565	0.51266	0.36706	0.26282	0.18818	0.13473	0.09647	...	8.1462E-16	5.83267E-16	4.1762E-16
7	0.022462	0.91371	0.71789	0.51552	0.37015	0.26576	0.19082	0.13701	0.09837	...	1.0888E-15	7.81748E-16	5.6129E-16
6	0.021599	0.91524	0.7212	0.51984	0.37481	0.27023	0.19484	0.14048	0.10129	...	1.6798E-15	1.21116E-15	8.7325E-16
5	0.027292	0.92027	0.72508	0.52563	0.38108	0.27628	0.2003	0.14522	0.10528	...	2.9864E-15	2.16516E-15	1.5697E-15
4	0.033185	0.93011	0.7287	0.53144	0.38742	0.28243	0.20589	0.15009	0.10942	...	5.2925E-15	3.85825E-15	2.8127E-15
3	0.04167	0.93622	0.73259	0.53729	0.39383	0.28868	0.2116	0.1551	0.11369	...	9.35E-15	6.85358E-15	5.0237E-15
2	0.04813	0.93208	0.73537	0.54023	0.39707	0.29184	0.2145	0.15766	0.11588	...	1.2413E-14	9.12369E-15	6.7059E-15
1	0.050843	0.92585	0.74077	0.54908	0.40687	0.30149	0.2234	0.16554	0.12267	...	2.8913E-14	2.14246E-14	1.5876E-14
0	0.135974	0.95469	0.72567	0.52708	0.38266	0.27781	0.20169	0.14643	0.10631	...	3.4467E-15	2.50233E-15	1.8167E-15

图 5-3 实际的大气气溶胶参数列表 (部分)

Fig. 5-3 List of aerosol parameters (part)

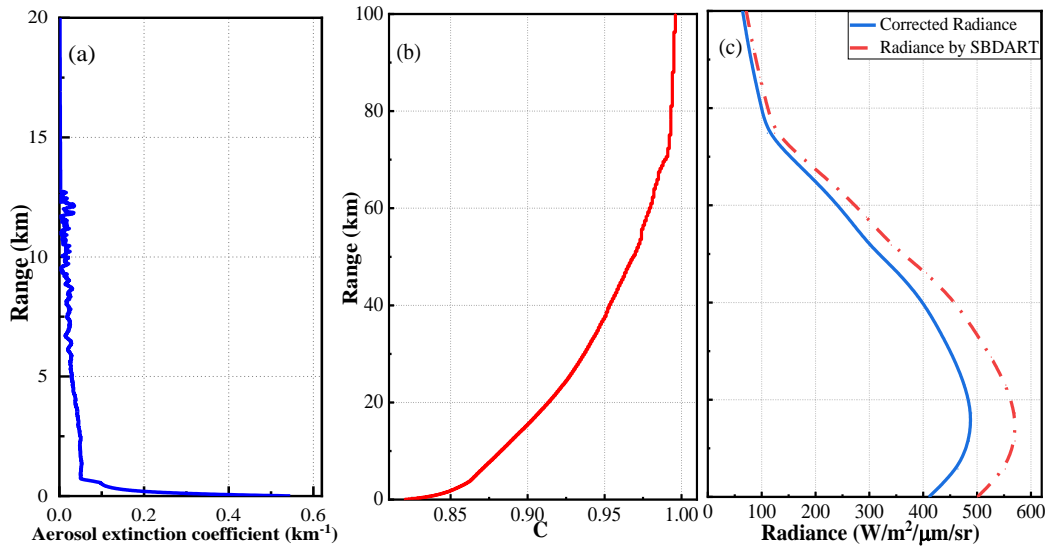


图 5-4 气溶胶消光系数廓线、校正系数和校正亮度

(a) 气溶胶消光系数 (b) 校正系数 (c) 校正亮度

Fig. 5-4 Aerosol extinction coefficient profile, calibration coefficient and corrected radiance

(a) Aerosol extinction coefficient (b) Calibration coefficient (c) Corrected radiance

图 5-5 (a) 为晴天实验条件下气溶胶消光系数廓线。图 5-5 (b) 为  $70^\circ$  观测天顶角方向上对气溶胶消光系数经查普曼函数积分后的校正曲线。可以看出，在地面处校正能力较强，随着观测距离的增加，校正能力逐渐降低，在  $38\text{ km}$  距离以上校正系数的作用微小，且整体校正能力弱于  $80^\circ$  观测方向。图 5-5 (c) 为经该校正系数校正前后 SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度分布曲线，以地面处的结果为例，校正前 SBDART 模式计算的亮度为  $624.6\text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ ，经校正后降低到  $521.6\text{ W/m}^2/\mu\text{m/sr}$ 。

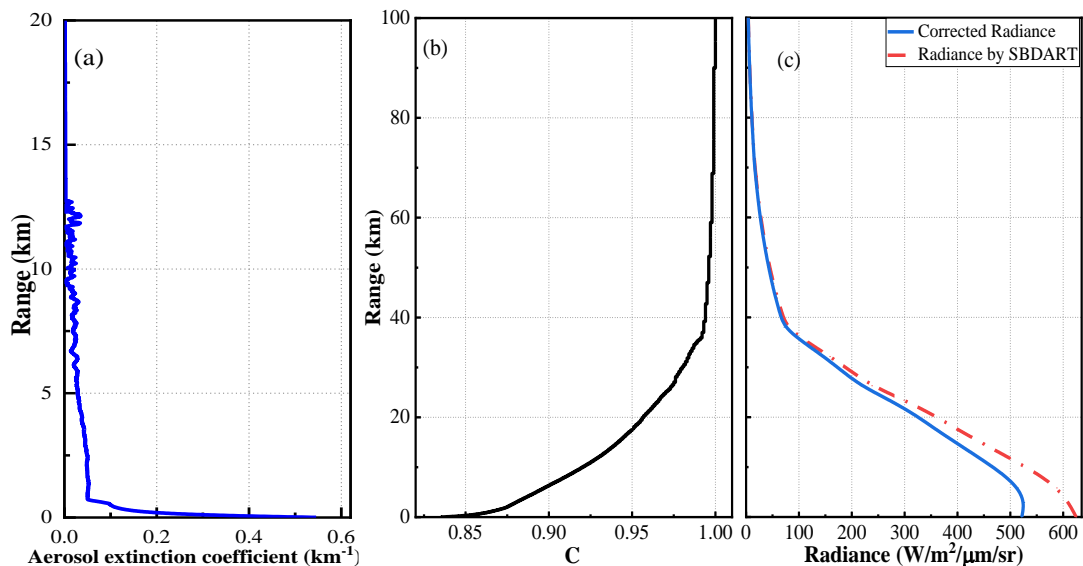


图 5-5 气溶胶消光系数廓线、校正系数和校正亮度

(a) 气溶胶消光系数 (b) 校正系数 (c) 校正亮度

Fig. 5-5 Aerosol extinction coefficient profile, calibration coefficient and corrected radiance

(a) Aerosol extinction coefficient (b) Calibration coefficient (c) Corrected radiance

### 5.2.2 云层条件下大气散射辐射亮度的校正

为获取云层天气下实际大气气溶胶特性参数随高度的变化情况，因此在 2020 年 11 月 19 日 16 点，于西安理工大学基于斜程能见度激光雷达系统开展垂直探测实验，实验当天天气多云。激光雷达垂直探测实验反演得到了气溶胶参数廓线，如图 5-6 所示，图中分别给出了气溶胶光学厚度增量、气溶胶光学厚度、单次散射反照率和不对称因子。

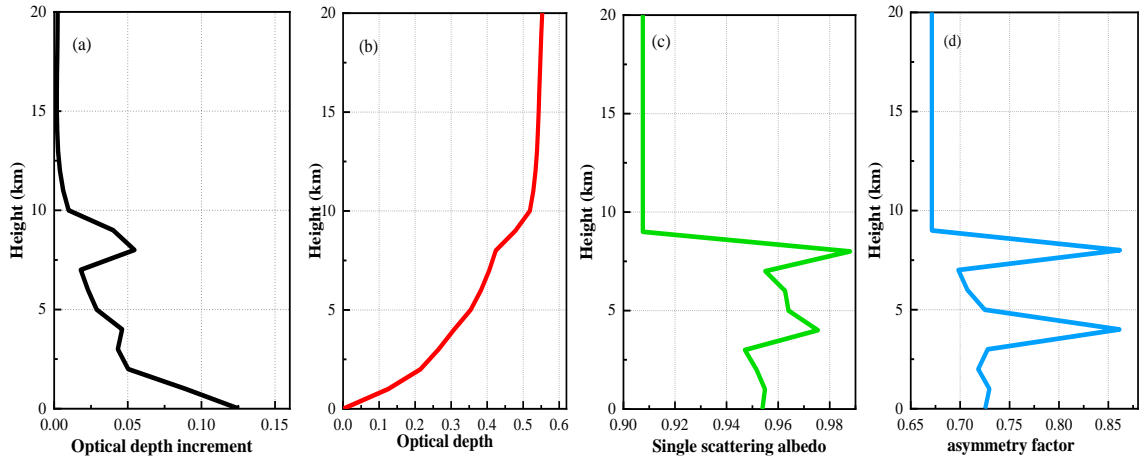


图 5-6 激光雷达探测反演获得 11 月 19 日气溶胶特性参量廓线

(a) 光学厚度增量 (b) 光学厚度 (c) 单次散射反照率 (d) 不对称因子

Fig. 5-6 The profile of aerosol parameters by lidar taken on November 19, 2020

(a) Optical depth increment (b) Optical depth (c) Single scattering albedo (d) Asymmetry factor

图 5-6 (a)中黑线为气溶胶光学厚度增量随高度变化的趋势。随着高度的升高，光学厚度增量呈现减小的趋势，但在 4 km 及 7.8 km 的高度上，由于云层的出现，光学厚度增量有明显增大变化。整层气溶胶光学厚度为 0.57 左右，如图 5-6 (b)中红线所示，云层天气下，整层光学厚度值高于晴天无云条件下的光学厚度值。从图 5-6 (c)-(d)给出的单次散射反照率和不对称因子曲线也可以看到在 4 km 和 7.8 km 的云层高度上的变化。在 10 km 以上大气气溶胶含量很少且基本没变化，单次散射反照率和不对称因子保持在 0.9075 和 0.6714<sup>[70]</sup>。

利用上述斜程能见度激光雷达系统结合后处理程序获取的反演结果，可自定义编写构成一个由气溶胶光学厚度、单次散射反照率、不对称因子和 106 阶散射相函数的勒让矩阵展开而组成的 33 层气溶胶特性参数列表 aerosol.dat 文件，作为 SBDART 模式的实际大气气溶胶特性输入参数，如图 5-7 所示。



Height	Optical depth	SSA	gg	Legendre Matrix (106)									
100	3.27E-14	0.9075	0.6714	0.671	0.45024	0.30211	0.20272	0.13602	0.09127	...	9.5281E-19	6.39269E-19	4.2881E-19
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
8	0.054483132	0.9879	0.8617	0.862	0.74304	0.6405	0.55211	0.47592	0.41025	...	1.96226E-07	1.69146E-07	1.458E-07
7	0.01802105	0.955	0.6982	0.698	0.4872	0.34007	0.23737	0.16568	0.11565	...	5.76719E-17	4.0255E-17	2.8098E-17
6	0.022853981	0.9627	0.7073	0.707	0.49985	0.35339	0.24985	0.17664	0.12489	...	2.18584E-16	1.54539E-16	1.0926E-16
5	0.028856185	0.964	0.7249	0.725	0.52563	0.38108	0.27628	0.2003	0.14522	...	2.98643E-15	2.16516E-15	1.5697E-15
4	0.046132748	0.9754	0.8612	0.861	0.74132	0.63828	0.54956	0.47317	0.4074	...	1.73911E-07	1.49738E-07	1.2892E-07
3	0.043213962	0.9471	0.7279	0.728	0.52998	0.38583	0.28088	0.20448	0.14886	...	4.58842E-15	3.34037E-15	2.4318E-15
2	0.050251564	0.9516	0.7183	0.718	0.51552	0.37015	0.26576	0.19082	0.13701	...	1.08879E-15	7.81748E-16	5.6129E-16
1	0.089053095	0.9549	0.7296	0.73	0.5329	0.38902	0.28398	0.20731	0.15133	...	6.10348E-15	4.45554E-15	3.2525E-15
0	0.125389432	0.9539	0.7253	0.725	0.52563	0.38108	0.27628	0.2003	0.14522	...	2.98643E-15	2.16516E-15	1.5697E-15

图 5-7 云层条件下气溶胶参数列表(部分)

Fig. 5-7 List of aerosol parameters under cloudy condition (part)

图 5-8 (a)为云层天气条件下经斜程能见度激光雷达系统垂直测量实验反演得到的气溶胶消光系数廓线，可看出在 7.8 km 高度处有明显的云层出现。图 5-8 (b)是 80° 观测天顶角方向上对气溶胶消光系数经查普曼函数进行积分得到的校正系数曲线。在该观测方向上大气辐射亮度传输的路径较长，垂直高度 7.8 km 处云层的校正效果呈现在斜程方向上约 45 km 远处，在图中呈现出明显的阶梯变化。在得到校正系数曲线后，即可校正 SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度结果，得到伪球形校正后的大气散射辐射亮度分布曲线，如图 5-8 (c)所示。地面处和云层处气溶胶含量较大，校正系数的校正能力较强，地面处校正前 SBDART 模式计算的亮度为 308.9 W/m<sup>2</sup>/μm/sr，校正后降低到 272.5 W/m<sup>2</sup>/μm/sr。云层高度处校正前 SBDART 模式计算的亮度为 350.9 W/m<sup>2</sup>/μm/sr，经校正后降低到 319.1 W/m<sup>2</sup>/μm/sr。云层以上的高度层中，由于气溶胶含量较少，校正系数的校正能力较弱，校正前后大气散射辐射亮度曲线分布差异较小。

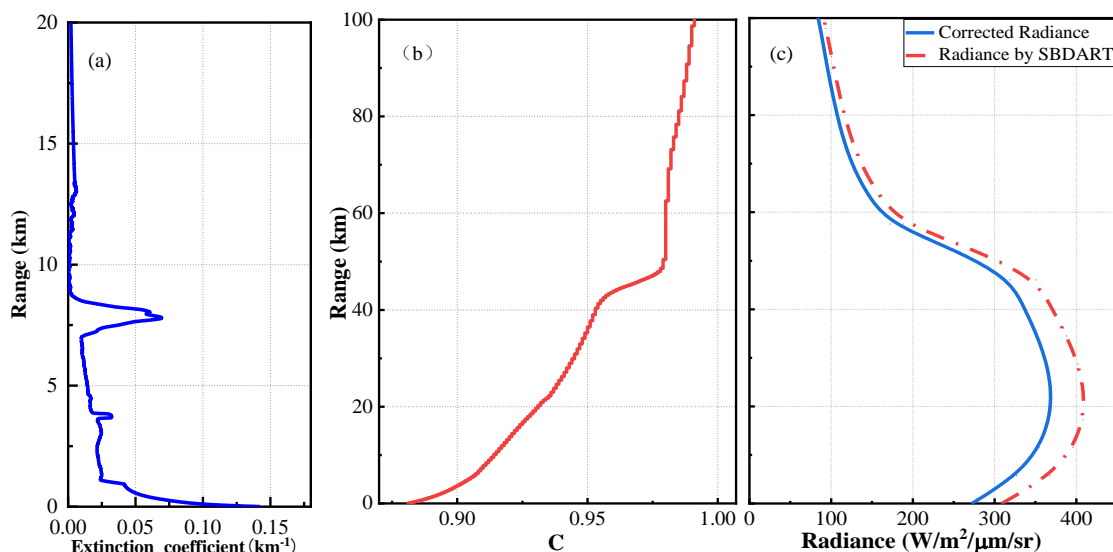


图 5-8 气溶胶消光系数廓线、校正系数和校正结果 (a) 气溶胶消光系数 (b) 校正系数 (c) 校正结果

Fig. 5-8 Aerosol extinction coefficient profile ,calibration coefficient and corrected radiance (a) Aerosol extinction coefficient (b) Calibration coefficient (c) Correted radiance

图 5-9 (a)为云层天气条件下气溶胶消光系数廓线。图 5-9 (b)是 70° 观测天顶角方向上对气溶胶消光系数经查普曼函数进行积分得到的校正系数曲线。在该观测方向上垂直高度 7.8 km 处云层的校正效果呈现在斜程方向上约 23 km 远处，在图中呈现出明显的阶梯变化。地面处和云层处气溶胶含量较大，校正系数的校正能力较强。图 5-9 (c)中地面处校正前 SBDART 模式计算的亮度为 329.9 W/m<sup>2</sup>/μm/sr，校正后降低到 299.4 W/m<sup>2</sup>/μm/sr。云层高度处校正前 SBDART 模式计算的亮度为 230.7 W/m<sup>2</sup>/μm/sr，校正后降低到 216.5 W/m<sup>2</sup>/μm/sr。云层以上的高度层中，由于气溶胶含量较少，校正系数的校正能力较弱，校正前后亮度曲线差异较小。

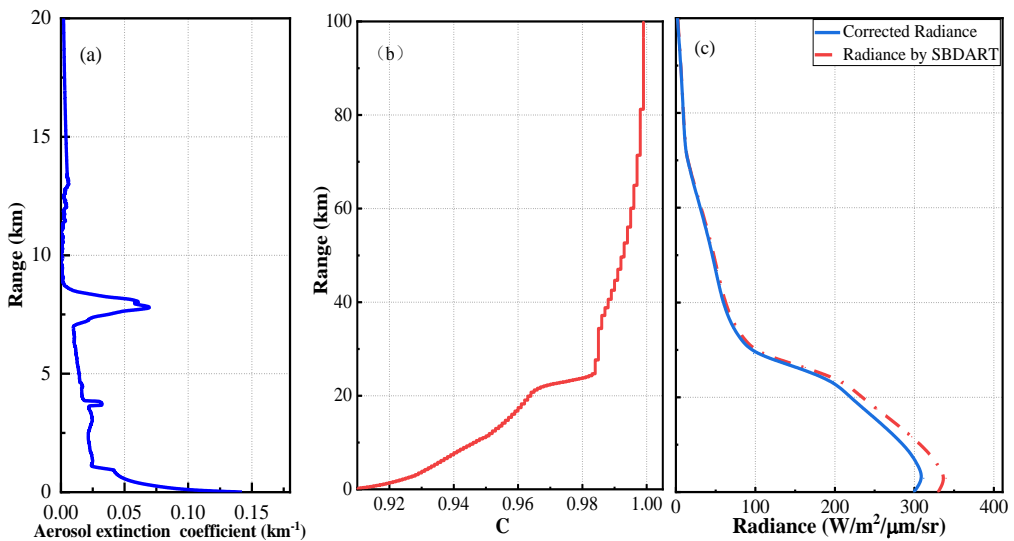


图 5-9 气溶胶消光系数廓线、校正系数和校正结果 (a) 气溶胶消光系数 (b) 校正系数 (c) 校正结果

Fig. 5-9 Aerosol extinction coefficient profile, calibration coefficient and corrected radiance

(a) Aerosol extinction coefficient (b) Calibration coefficient (c) Corrected radiance

### 5.3 大气散射辐射亮度校正的斜程能见度测量

#### 5.3.1 斜程能见度测量原理

目前，对于斜程能见度的探测，主要为飞行员根据自身经验用肉眼粗略目观测、激光雷达能见度仪等仪器探测<sup>[71,72]</sup>，以及基于斜程能见度的探测原理进行理论计算得到相应的能见度数值，该方法涉及到观测方向上的大气散射辐射亮度。当观测者通过大气向高空观察目标物时，随着目标物距离越来越远，目标物逐渐呈现出模糊的状态；从某一距离起，无论观测者怎样去看也无法将目标物从背景中识别出来，这一临界距离称为能见距<sup>[73]</sup>。由斜程能见度的基本定义，斜程能见度的大小取决于目标物和背景的对比度  $C^*$  表示为<sup>[74]</sup>：

$$C^* = \left| \frac{L_o^* - L_c^*}{L_c^*} \right| \quad (5-1)$$

式中  $L_o^*$  和  $L_c^*$  分别为目标物和背景物的视亮度。激光雷达系统可以通过斜程方向上的探测，并在收集到的回波信号的基础上反演大气气溶胶的垂直光学厚度分布和气溶胶散射特性

参数。通过辐射传输模式的计算，可以得出大气散射辐射亮度的具体大小。利用这些数据，我们可以计算目标物和背景的视亮度如下所示：

$$\begin{cases} L_o^* = L_o \cdot \tau + D \\ L_b^* = L_b \cdot \tau + D \end{cases} \quad (5-2)$$

其中， $L_o$  和  $L_b$  为目标物和背景的固有亮度，即到达目标物和背景的辐射亮度经过目标物和背景反射而形成的目标物和背景本身的发光亮度，固有亮度是一种相对于周围环境而言的属性，不随环境的改变而改变。 $D$  为实际实验天气条件下利用辐射传输模式运行得到的观测方向上大气散射辐射亮度：

$$D = \frac{1}{u} \int_{\delta}^{\delta_0} J(\delta', \theta, \varphi) e^{-\delta'/u} d\delta' \quad (5-3)$$

其中  $\delta_0$  为大气光学厚度， $J$  为源函数， $\theta$  和  $\varphi$  分别为观测方向的天顶角和方位角。其中目标物和背景的固有亮度  $L_o$  和  $L_b$  可以表示为：

$$\begin{cases} L_o = \frac{I_o \cdot \rho_o}{\pi} \\ L_b = \frac{I_o \cdot \rho_b}{\pi} \end{cases} \quad (5-4)$$

式中， $I_o$  为到达目标物和背景的直接和散射辐射亮度， $\rho_o$  和  $\rho_b$  分别为目标物的反射率和背景的反射率。根据公式(5-1)-(5-4)，在考虑了观测方向上大气散射辐射亮度后可以得到该方向上的对比度计算公式：

$$C^* = \left| \frac{\rho_o - \rho_b}{\rho_b + \frac{\pi \cdot D}{I_o \cdot \tau}} \right| \quad (5-5)$$

在环境固定、目标和背景反照率均为定值的条件下，准确测量大气散射辐射亮度对于计算对比度至关重要。通过使用斜程能见度激光雷达系统，我们可以获取不同天气条件下的实验数据，并反演出气溶胶特性参数。通过辐射传输模式运算，我们可以得到观测方向上的大气散射辐射亮度，并且在伪球形理论的基础上对亮度进行简单校正。最后，我们利用到达地面的直接和散射辐射亮度求解特定方向上的对比度。

### 5.3.2 大气散射辐射亮度校正前后斜程能见度比较

在实际机场跑道应用场景需求下，本节选择了在  $80^\circ$  观测天顶角方向上利用校正前后大气散射辐射亮度结合到达地面的直接和散射辐射亮度计算斜程能见度。图 5-10 (a) 为晴空条件下，在  $80^\circ$  观测天顶角方向上，SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度和经查普曼函数校正后的大气散射辐射亮度随高度分布的曲线，图中黑线为 SBDART 模式计

算的大气散射辐射亮度曲线，红线为校正后的亮度曲线。

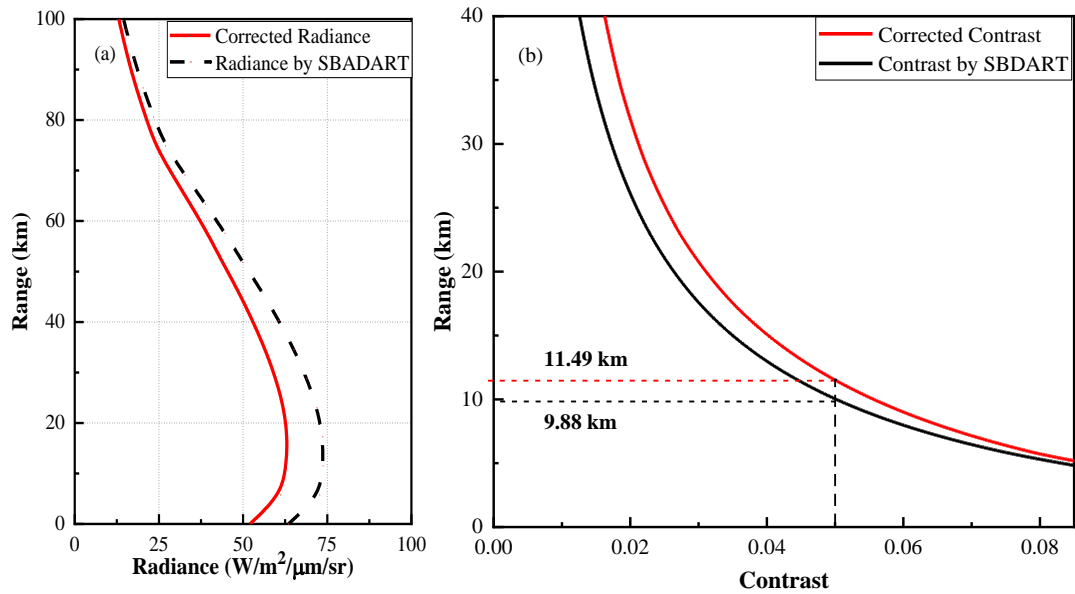


图 5-10 晴空条件下校正前后的大气散射辐射亮度及对比度

(a) 大气散射辐射亮度 (b) 对比度

Fig. 5-10 Scattered radiance and contrast before and after correction under clear condition

(a) Scattered radiance (b) Contrast

在得到 SBDART 模式计算结果以及校正后的大气散射辐射亮度再结合实际实验时到达地面的直接和散射辐射亮度约为  $465 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}$ ，根据斜程能见度的反演公式(5-5)，计算得到该探测方向上的对比度曲线，结果如图 5-10 (b) 所示。结果显示，当对比度阈值为较高飞行安全阈值 0.05 时，校正前得到的斜程能见距约为 9.88 km，经伪球形校正后，对应的斜程能见距提升到 11.49 km。

图 5-11 (a) 为云层天气条件下，在  $80^\circ$  观测天顶角方向上，未校正和校正后 SBDART 模式运算的大气散射辐射亮度曲线，黑线为未校正的大气散射辐射亮度曲线。进而，结合到达地面的直接和散射辐射亮度约为  $293 \text{ W/m}^2/\mu\text{m}$ ，根据对比度公式 (5-5)，得到大气散射辐射亮度校正前后的对比度曲线，结果如图 5-11 (b) 所示。从图中可以看出，利用校正前的大气散射辐射亮度计算得到的对比度曲线如图中黑线所示，当对比度阈值为 0.05 时，对应的探测的斜程能见距约为 4.17 km。利用校正后的大气散射辐射亮度得到的对比度曲线如图中红线所示，此时对应的斜程能见距为 5.03 km，略高于校正前的结果。

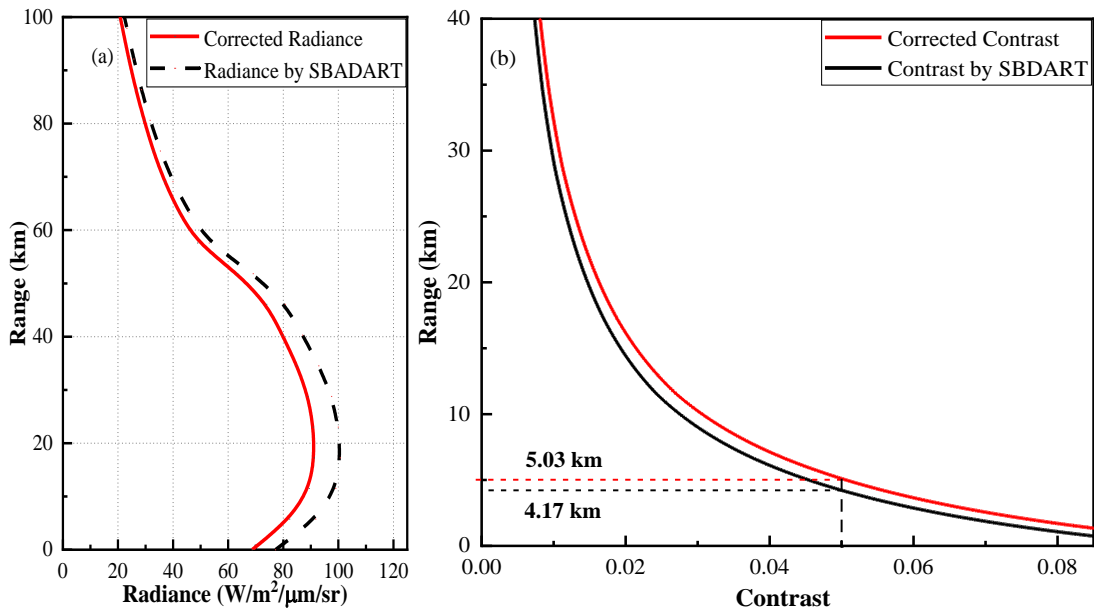


图 5-11 云层条件下校正前后的大气散射辐射亮度及对比度

(a) 大气散射辐射亮度 (b) 对比度

Fig. 5-11 Scattered radiance and contrast before and after correction under cloudy condition

(a) Scattered radiance (b) Contrast

## 5.4 本章小结

本章首先介绍了由西安理工大学搭建的斜程能见度激光雷达系统，在实际天气条件下基于斜程能见度激光雷达系统开展垂直探测实验，将系统测得数据结合后处理程序反演计算得到的实际气溶胶特性参数，并与其他环境参数作为 SBDART 辐射传输模式的输入项，计算较大观测天顶角方向上大气散射辐射亮度的结果。之后在伪球形校正理论基础上，对 SBDART 模式计算结果进行简单校正。最后在实际应用场景下，使用校正前后的 SBDART 模式计算实际大气散射辐射亮度，结合到达地面的直接和散射辐射亮度，计算出校正前后的对比度曲线。实验结果说明，在较大的观测天顶角方向上，利用查普曼函数校正后的大气散射辐射亮度，能够提高系统对于实际斜程能见距的测量，在晴天条件下，斜程能见距由 9.88km 提高到 11.49km；云层条件下，斜程能见距由 4.17km 提高到 5.03km，在一定程度上减小了由平行平面大气辐射传输模式引起的误差。

## 6 总结与展望

### 6.1 总结

大气散射辐射亮度作为大气光学特性中的一个重要参量，在大气成分探测、空间目标识别和航空安全等领域具有重要科学研究意义和工程应用价值。尤其是在白天斜程能见度探测中，斜程方向上的大气散射辐射亮度直接影响该方向的斜程能见度。本文以大气散射辐射亮度为研究对象，以平行平面大气模型 SBDART 辐射传输模式和伪球形大气模型 libRadtran 辐射传输模式为手段，开展不同辐射传输模式的大气散射辐射亮度模拟对比和相互校正研究，并将校正后的大气散射辐射亮度结果应用到斜程能见度测量中。

具体完成了以下工作：

(1) 首先介绍了大气散射辐射亮度的研究意义以及目前的获得方法。接着，对获取大气散射辐射亮度的研究现状进行了综述，包括理论仿真和辐射传输方程求解方法与模式的应用。在此基础上，重点阐述了辐射传输方程的基本理论，从最原始的光辐射传输方程出发，推导出适用于各种情况的一般辐射传输方程形式。针对比尔伯格定律和 Schwarzschild 方程的解，得出了基于分层大气的一维大气单色辐射传输方程的一般求解形式。并且，从众多辐射传输模式中选择了 SBDART 辐射传输模式和 libRadtran 辐射传输模式进行介绍。SBDART 模式采用平行平面大气模型，而 libRadtran 模式则采用伪球形大气模型。对两个模式的运行步骤和流程进行了简要介绍。

(2) 基于辐射传输方程及其求解理论，开展了 SBDART 模式和 libRadtran 模式对大气散射辐射亮度的模拟。分别利用两个模式对晴天和云层天气条件下的大气散射辐射亮度进行了模拟，以 libRadtran 模式模拟结果作为真值，重点对比了不同高度层大气散射辐射亮度分布、不同方向的大气散射辐射亮度以及到达地面的太阳直接和散射辐射亮度的输出结果。模拟结果发现：在太阳位置处，SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度最大，且高于 libRadtran 模式模拟结果。在较大的观测天顶角方向上，SBDART 模式计算的大气散射辐射亮度高于 libRadtran 模式，并且随着观测天顶角的减小，两者计算结果的相对误差逐渐减小。对比和分析结果表明：在较大的观测天顶角方向上，由 SBDART 模式模拟的大气散射辐射亮度明显高于 libRadtran 模式的结果，反映了在较大的观测天顶角方向上对 SBDART 模式的计算结果进行校正的必要性。

(3) 基于平行平面和伪球形辐射传输方程的差异性，提出了基于 libRadtran 的伪球形大气校正方法，引入查普曼校正函数，对大气校正系数和大气校正过程进行了仿真模拟，对不同观测天顶角方向上的校正函数和大气散射辐射亮度校正结果进行了分析，仿真结果表明：在较小的观测天顶角方向上，可近似忽略使用平行平面大气模型对于实际大气估计误差的影响，无需做校正；在较大观测天顶角方向（大于  $70^\circ$ ）上，校正后的 SBDART 模式大气散射辐射亮度更接近伪球形大气模型的计算结果，验证了伪球形校正

方法的正确性和有效性。

(4) 最后, 利用西安理工大学已搭建的斜程能见度激光雷达系统进行了探测实验, 开展实际大气散射辐射亮度的校正和应用。利用激光雷达探测实验数据, 以实际大气气溶胶特性参数作为 SBDART 辐射传输模式自定义输入, 对实际大气条件下的大气散射辐射亮度进行了校正和结果分析; 最后, 根据斜程能见度的精确反演理论, 获得大气散射辐射亮度校正前后的目标物和背景对比度, 并对校正前和校正后的斜程能见度进行讨论和分析。实验结果表明, 在较大的观测天顶角下, 利用查普曼函数校正后的大气散射辐射亮度, 能够提高实际的斜程能见距的测量, 一组晴天条件下的示例反映了校正后的斜程能见距由 9.88km 提高到 11.49km, 一组云层条件下的斜程能见距则由 4.17km 提高到 5.03km, 在一定程度上减小了由平行平面大气辐射传输模型引起的误差。

## 6.2 展望

本文通过不同的辐射传输模式, 对辐射传输方程进行了求解, 模拟了在不同大气模型, 不同天气条件下的大气散射辐射亮度, 以及依靠完善的实验设备获取实际的大气气溶胶特性参数, 计算出不同模式下实际大气散射辐射亮度, 并在平行平面大气基础上进行了简单的伪球形校正, 使其运算结果更接近于实际大气下的测量结果。但实际大气复杂程度远不止文中所述, 它还需要考虑地球自转及真实的大气曲率, 各向同性等特点, 所以在后续工作中选用合适的辐射传输模式, 逐渐将上述因素考虑到仿真计算中。

由于激光探测的限制, 激光雷达系统无法在恶劣天气条件下准确地获取实际大气气溶胶光学特性参数。同时, 现有的辐射传输模式软件库内置的标准大气模型参数是基于 AFGL 众科学家根据当地情况的实际大气所计算得来, 例如大气温湿度廓线、气溶胶特性参数和太阳光谱辐数据等, 与本文中实际测量地点的大气情况存在差异, 经该标准大气参数下计算的斜程方向上的大气散射亮度结果与实际大气间存在一定的误差, 因此需要采用更成熟仪器或系统对实验地点的实际大气进行测量以得到更为准确的大气成分廓线, 以确保计算结果更加趋近真实值, 为之后斜程能见度精确计算提供保证。

## 参考文献

- [1] 徐玉貌,刘红年,徐桂玉.大气科学概论[M].南京大学出版社,2013.
- [2] 赵阳,李明哲.天空背景辐射亮度对高空目标探测影响效应分析[J].影像视觉,2016,17(4):57-59.
- [3] Dong W , Wei Z , Yong C ,et al.Measurement of Sky Background Infrared Radiant Intensity and Analysis of it's Effect on Target Detection[J].Infrared Technology, 2015, 37(9):774-777.
- [4] Wang T , Jiang F , Deng J ,et al.Urban air quality and regional haze weather forecast for Yangtze River Delta region[J].Atmospheric Environment, 2012, 58(Oct.):70-83.DOI:10.1016/j.atmosenv.2012.01.014.
- [5] 张景伟,武鹏飞,饶瑞中.红外大气能见度:定义、算法及关键因素分析[J].光学学报,2015,35(11):18-25.
- [6] 王继志,徐祥德,杨元琴.北京城市能见度及雾特征分析[J].应用气象学报,2002(S1):160-169.
- [7] 施悯悯,张庆国,张浩,王凤文.合肥市大气能见度变化特征及其影响因素[J].应用生态学报,2017,28(2):485-492.
- [8] Damiani A , Diego P , Laurenza M ,et al.Ozone variability related to several SEP events occurring during solar cycle no. 23[J].Advances in Space Research, 2009, 43(1):28-40.
- [9] 杜嘉敏,王玉峰,秦一丁,李仕春,狄慧鸽,宋跃辉,闫庆,华灯鑫.基于激光雷达和 SBDART 模式的大气散射辐射亮度计算[J].光学学报,2022,42(12):98-109.
- [10] 王晓蕊,张建奇.基于机器视觉的红外成像系统探测性能评估[J].红外与毫米波学报,2003,22(4):273-276.
- [11] 孙凤莹,梅海平,武鹏飞,饶瑞中.地基天空背景辐射测量技术及其应用研究现状与展望[J].大气与环境光学学报,2017,12(02):81-92.
- [12] Long C N , Slater D W , Tooman T .Total Sky Imager Model 880 Status and Testing Results[J].Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2001.
- [13] Kocifaj M, Kómar L, Kundracik F. PePSS-A portable sky scanner for measuring extremely low night-sky brightness[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 210: 74-81.
- [14] Feister U , Shields J . Cloud and radiance measurements with the VIS/NIR Daylight Whole Sky Imager at Lindenberg (Germany)[J]. Meteorologische Zeitschrift, 2005, 14(5):627-639.
- [15] Donovan E , Mende S , Jackel B , et al. The THEMIS all-sky imaging array—system design and initial results from the prototype imager[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2006, 68(13):1472-1487.
- [16] 李宇,吕达仁,霍娟,等.物理-统计反演和云-晴空辐射特征差异检测结合的全天空高云判别能力改进算法与初步试验[J].气象学报,2013(1):134-145.



- [17] 霍娟, 吕达仁. 全天空数字相机观测云量的初步研究[J]. 大气科学学报, 2002, 025(002):242-246.
- [18] 苏源, 吴林林, 陶法, 胡树贞, 程欣. 可见光/红外全天空成像仪和云雷达联合反演云高[J]. 大气与环境光学学报, 2023, 18(02):89-98.
- [19] 王敏, 周树道, 刘展华, 等. 相机成像性能对图像法大气能见度测量精度影响的分析[J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(9): 78-81.
- [20] 王敏, 庄志豪, 王康, 周树道, 张阳春. 目标板反射对图像法测量能见度的误差分析[J]. 科学与技术, 2021, 21(18):7657-7662.
- [21] 胡方超, 张兵, 陈正超, 等. 利用太阳光度计 CE318 反演气溶胶光学厚度改进算法的研究[J]. 光学技术, 2007 (S1): 38-41.
- [22] Pandithurai, G. Aerosol radiative forcing over a tropical urban site in India[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(12):261-268.
- [23] Legg T . Comparison of daily sunshine duration recorded by Campbell–Stokes and Kipp and Zonen sensors[J]. Weather, 2014, 69(10):264–267.
- [24] 刘伟峰, 赵国民, 王雷, 等. 天空光辐射亮度测量系统设计[J]. 应用光学, 2010(03):455-458.
- [25] 李威, 詹杰, 邵士勇, 梅海平, 饶瑞中. 一种半球形天空亮度测量仪器的研制[J]. 光学学报, 2008(10):1844-1848.
- [26] 徐文清, 詹杰, 徐青山. 天空背景亮度测量系统的研制[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 46-52.
- [27] 郭彩丽. 大气辐射导论(第2版)[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(1):79-79.
- [28] Meador W E, Weaver W R. Two-stream approximations to radiative transfer in planetary atmospheres: A unified description of existing methods and a new improvement[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1980, 37(3): 630-643.
- [29] Kylling A, Stamnes K, Tsay S C. A reliable and efficient two-stream algorithm for spherical radiative transfer: Documentation of accuracy in realistic layered media[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1995, 21(2):115-150.
- [30] Chai J C , Lee H O S , Patankar S V . TREATMENT OF IRREGULAR GEOMETRIES USING A CARTESIAN COORDINATES FINITE-VOLUME RADIATION HEAT TRANSFER PROCEDURE[J]. Numerical Heat Transfer Fundamentals, 1994, 26(2):225-235.
- [31] Furmanski P, Banaszek J. Finite element analysis of concurrent radiation and conduction in participating media[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2004, 84(4): 563-573.
- [32] 安巍, 阮立明, 谈和平. 一维瞬态辐射传输的有限元法模拟[J]. 工程热物理学报, 2007,

- 28(1):110-112.
- [33] Badri M A, Jolivet P, Rousseau B, et al. Vectorial finite elements for solving the radiative transfer equation[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 212: 59-74.
- [34] Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W J, et al. Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(12):2502-2509.
- [35] FIVELAND, W. A. Three-dimensional radiative heat-transfer solutions by the discrete-ordinates method[J]. *J Thermophysics*, 1988, 2(4):309-316.
- [36] 胡丽琴, 刘长盛. 利用 DISORT 和矩阵算法计算辐射强度的比较[J]. *南京大学学报:自然科学版*, 1998(6):738-745.
- [37] 李英华. 大气气溶胶辐射参数化方案的对比分析[D]. 兰州大学, 2006.
- [38] 张春文, 吴红波, 郭忠明, 贺建桥. 基于 DISORT 算法的冰川表面温度反演研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2014, 30(05):12-18.
- [39] 马菁, 孙亚松. 基于离散坐标的谱配置法对太阳能辐射传输特性的研究[J]. *中国科技论文*, 2016, 11(11):1240-1244.
- [40] 李京英. 基于球谐离散坐标法的高超声速飞行器尾焰紫外辐射特性研究[D]. 西安电子科技大学, 2018.
- [41] Feng, Davis, Anthony, et al. Linearization of Markov chain formalism for vector radiative transfer in a plane-parallel atmosphere/surface system[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(16):3491-3507.
- [42] Sun Y, Zhang X, Howell J R. Assessment of different radiative transfer equation solvers for combined natural convection and radiation heat transfer problems[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 194: 31-46.
- [43] Berk A, Anderson G P, Acharya P K, et al. MODTRAN5: a reformulated atmospheric band model with auxiliary species and practical multiple scattering options[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2004, 5425:341-347.
- [44] Emde C, Buras R, Mayer B. ALIS: An efficient method to compute high spectral resolution polarized solar radiances using the Monte Carlo approach[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, 112( 10):1622-1631.
- [45] Ricchiazzi P, Yang S, Gautier C, et al. SBDART: A research and teaching software tool for plane-parallel radiative transfer in the Earth's atmosphere[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(10): 2101-2114.
- [46] 孙囡, 陈逸伦, 傅云飞. 中国东部大气温湿廓线特征及其对辐射收支计算影响的分析[J]. *气象学报*, 2019, 77(03):563-578.

- [47] 张婷,刘磊,高太长,胡帅.联合测云体制下的光学厚度反演技术研究[J].激光与光电子学进展,2020,57(19):276-281.
- [48] 陆川,刘文清,王玉峰,贾立松,高天乐,李兴兴,李仕春,狄慧鸽,刘晶晶,宋跃辉,华灯鑫.斜程能见度计算中的天空背景辐射亮度仿真与分析[J].光学学报,2020,40(14):7-17.
- [49] Che H , Zhao H , Wu Y , et al. Analyses of aerosol optical properties and direct radiative forcing over urban and industrial regions in Northeast China[J]. Meteorology & Atmospheric Physics, 2015, 127(3):345-354.
- [50] Wang Y, Jia L, Li X, et al. Measurement method for slant visibility with slant path scattered radiance correction by lidar and the SBDART model[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 837-853.
- [51] Arkian F, Nicholson S E. Long-term variations of aerosol optical depth and aerosol radiative forcing over Iran based on satellite and AERONET data[J]. Environmental monitoring and assessment, 2018, 190: 1-15.
- [52] Yufeng Wang, Xingxing Li, Yiding Qin, et al. Investigation and analysis of actual atmospheric scattered radiance and slant visibility by two-wavelength Raman-Mie lidar[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2022, 288: 108250.
- [53] Mayer B, Kylling A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2005, 5(7):1855-1877.
- [54] 孙宇, 林龙福, 赵增亮,等. libRadtran 的云辐射传输模式及其与 SBDART 的比较[J]. 大气与环境光学学报, 2010, 5(1):19-25.
- [55] 郭俊杰, 姚志刚, 韩志刚, 等. TG-2 多角度偏振成像仪云相态识别机载验证试验[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(3): 439-448.
- [56] Vicent J , Verrelst J , Sabater N , et al. Comparative analysis of atmospheric radiative transfer models using the Atmospheric Look-up table Generator (ALG) toolbox (version 2.0)[J]. Geoscientific Model Development, 2020, 13(4):1945-1957.
- [57] Grob H, Emde C, Wiegner M, et al. The polarized Sun and sky radiometer SSARA: design, calibration, and application for ground-based aerosol remote sensing[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13(1): 239-258.
- [58] Molero F, Fernández A J, Revuelta M A, et al. Effect of vertical profile of aerosols on the local shortwave radiative forcing estimation[J]. Atmosphere, 2021, 12(2): 187.
- [59] 甘鑫, 高欣健, 钟彬彬, 等. 基于有限样本的大气偏振模式生成方法[J]. 光电工程, 2021, 48(5): 200331-1-200331-15.
- [60] 崔岩,刘亚飞,刘康,褚金奎.地表反照率对天空偏振模式的影响[J].光学学报,2021,41(17):18-25.

- [61] Ramanathan V .Radiative Transfer Within the Earth's Troposphere and Stratosphere: A Simplified Radiative-Convective Model[J].Journal of the Atmospheric Sciences, 1976, 33(7):1330-1346.
- [62] Schuckmann K V , Cheng L , Palmer M D ,et al.Heat Stored in the Earth System: Where Does the Energy Go?[J].Earth System Science Data, 2020, 12(3):2013-2041.
- [63] Harder J, Lawrence G, Fontenla J, et al. The Spectral Irradiance Monitor: Scientific Requirements, Instrument Design, and Operation Modes[J]. Solar Physics, 2005, 230(1-2):141-167.
- [64] Mcclatchey R A, Fenn R W, Selby J E A, et al.Optical Properties of the Atmosphere (Third Edition)[J].Optical Properties of the Atmosphere, 1972, 32:1516-1517.
- [65] Allen D R , Stanford J L , Nakamura N ,et al.Antarctic polar descent and planetary wave activity observed in ISAMS CO from April to July 1992[J].Geophysical Research Letters, 2000, 27(5):665–668.
- [66] Kim I I , Mcarthur B , Korevaar E J Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications[J].Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2001, 4214(2):26-37.
- [67] Hu Y X, Stamnes K. An accurate parameterization of the radiative properties of water clouds suitable for use in climate models[J]. Journal of Climate, 1993, 6(4):728-742.
- [68] Dahlback A, Stamnes K. A new spherical model for computing the radiation field available for photolysis and heating at twilight[J]. Planetary & Space Science, 1991, 39(5):671-683.
- [69] 盛裴轩. 大气物理学[M]. 北京大学出版社, 2013.
- [70] 贾立松. 基于激光雷达的斜程能见度反演方法与实验研究[D]. 西安理工大学, 2021.
- [71] 庄子波, 台宏达, 蒋立辉. 一种基线长度改变的能见度测量和评价方法[J]. 光学学报, 2016, 36(02):9-17.
- [72] 傅刚, 李晓岚, 魏娜. 大气能见度研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2009 (5): 855-862.
- [73] Xiong X L, Liu W Q, Jiang L H, et al. Slant-range visibility retrieve considering multiple-scattering effects[J]. Guangdianzi Jiguang/Journal of Optoelectronics Laser, 2014, 25(9): 1742-1748.
- [74] 饶瑞中. 大气中的视觉和大气能见度[J]. 光学学报, 2010, 30(09):2486-2492.