

SBDART 辐射传输模式及其在飞机 潜在积冰区反演中的应用

王新炜 白 洁 刘健文 李 玮

(空军第七研究所, 北京 100085)

摘要 SBDART(平面平行辐射传输模式)是近年来国际上比较流行的一种计算辐射传输的模式,该模式旨在解决在卫星遥感和大气辐射能量平衡研究中遇到的各种辐射传输问题。它是基于大量经过仔细筛选的物理模式而建立起来的辐射传输模式,并且在实践中发展完善。文章详细介绍了 SBDART 模式的功能和结构,并利用 SBDART 模式结合卫星资料反演出云的光学厚度、有效粒子半径及消光系数,实现了对飞机积冰区域的有效识别。

关键词 辐射传输模式 平面平行辐射传输模式 飞机积冰

引言

地气系统及其表面的温度和环流主要由地球接收的太阳辐射能量控制,因此准确和定量的掌握地球辐射场对于了解和预报地球系统各组成部分的演变是至关重要的。

近 10 年来,高效的辐射传输算法使得大气辐射传输模式能够面向更广泛的用户。如 LOWTRAN^[1]和 MODTRAN^[2]系列是计算大气透过率及辐射的软件包,它们分别以 20cm^{-1} 和 2cm^{-1} 的光谱分辨率计算了大气透过率、大气背景辐射、单次散射的阳光和月光的辐射亮度、太阳直射辐照度等。但这两个模式处理散射问题时的二流近似限制了其计算精度,与方向有关的辐射亮度计算精度不高。为了提高 LOWTRAN 和 MODTRAN 模式处理有云大气辐射传输的精度并提供方便易用的软件工具, Ricchiazzi 开发了 SBDART(Santa Barbara DIS-ORT Atmospheric Radiative Transfer)模式^[3~4],它是计算晴空和有云状况下地球大气和表面的平面平行大气辐射传输的程序,包括所有影响紫外线、可见光和红外辐射的重要过程。

1 SBDART 模式的基本假定

(1) SBDART 模式在处理能见度 V 参数确定气

溶胶粒子数密度廓线时,将大气分为 5 个高度区间:

0 ~ 2km 高度区间:数据库用 5 个能见度($V = 2, 5, 10, 23, 50\text{km}$)的气溶胶密度系数 $N(z, V)$ 表示,其它能见度(如用户指定的能见度)下的粒子数密度可以用内插法求得。这个高度区间的 $N(z, V)$ 与季节变化无关。

2 ~ 4km 高度区间:有能见度 $V = 23\text{km}$, $V = 50\text{km}$ 两个数据库,其他能见度的 $N(z, V)$ 同样可以内插获得。该区间的气溶胶密度系数与季节变化有关。

4 ~ 10km 高度区间:能见度 $V = 50\text{km}$, $N(z, 50)$ 直接赋值,无能见度选择,但有季节变化。

10 ~ 30km 高度区间:气溶胶粒子数密度系数 $N(z)$ 与能见度无关,但同样与季节变化相关,另外在平流层还有 4 个与火山有关的数据库可供选择:①背景平流层气溶胶;②中等火山喷发期;③强火山喷发时期;④极强火山喷发期。

30 ~ 100km 高度区间: $N(z)$ 与能见度无关,相应也有 4 个气溶胶数据库,即:①正常高层大气气溶胶;②火山期→正常期过渡时期;③火山初期→强火山期过渡时期;④强火山时期。

(2) 计算大气透过率时,除分子吸收过程外,还考虑了连续吸收、分子散射和气溶胶削弱。总透过率是以上各部分透过率之乘积。

(3)对某一光路,大气透过率和射出辐射依赖于光路上吸收物质和散射物质的含量以及它们沿光路的分布情况。为求得这些物质的含量,假定海平面至100km间的大气层可以划分为一系列的球面薄层。每一薄层的边界对应一定的高度、气压、温度和吸收体(气体或气溶胶)密度。在薄层边界之间,温度是线性变化的,气压和密度呈指数形式变化。每一薄层都处于热力学平衡状态。

(4)计算辐射量时,除大气本身的辐射外,还包括散射的太阳(或月亮)辐射以及下垫面反射的辐射。

2 SBDART 模式的功能

(1)程序中自带6种有代表性的大气廓线,模拟以下6种气候原型:热带大气、中纬度夏季、中纬度冬季、副极地夏季、副极地冬季以及US62气候模式。这些模式大气广泛地应用于大气科学的研究中^[5],并且提供了包括气压、温度、水汽含量以及臭氧浓度的标准垂直廓线。用户只要输入参数,就可以得到所需纬度带上0.25~100.0 μm 范围内任一波段的辐射通量密度。此外,用户还可以利用一系列的无线电探空廓线建立自己的模式大气,通过选取控制参数,由用户自己定义大气廓线或输入探空数据,以代替程序中的大气廓线。

(2)程序能够计算几种普通边界层和高层大气气溶胶类型的辐射值。在边界层,用户可以选择乡村、城市以及海洋的标准气溶胶模式。这些模式由于在不同的波段拥有不同的消光系数、单次散射反照率以及非对称因子而彼此不同。

(3)对于综合辐射环境来说,地表覆盖物是一个重要的决定因子。在SBDART模式中建立了5种标准地表类型:海面、湖面、植被、雪盖和沙地。它们用来对地表的谱反照率进行参数化,定义了地表的上升和下降的谱辐照度。在SBDART模式中的输入参数允许用户利用权重因子建立一个包括水面、雪盖、植被和沙地的混合地表类型。例如,结合植被、水面和沙地可以调整建立一个代表新老植被交替或落叶林和常绿植物混合的地表类型反射率,或利用较小比例的水面和沙地的混合建立接近于湿地地表类型的反射率。

(4)作为一个实用的软件包,SBDART包括了辐射传输计算的基本数据。提供了6种参考大气模式的温度、气压、密度的垂直廓线;水汽、臭氧、甲烷、

一氧化碳、二氧化碳的混合比垂直廓线及其他13种微量气体的垂直廓线;城乡大气气溶胶、雾、沙尘、火山喷发物、云、雨的廓线和辐射参量如消光系数、吸收系数、非对称因子的光谱分布。

(5)1988年Stamnes^[6]等人解决了离散坐标法矩阵形式中的特征值和特征矢量求解问题以及积分常数的求解问题,同时公布了离散坐标法(Discrete Ordinate Method)的辐射传输软件包——DISORT,这使得离散坐标法的广泛应用成为可能。SBDART软件包采用离散坐标法求解辐射传输方程,给出了完全稳定的解析解,成为普遍公认的辐射传输精确算法的实用软件包。可求解垂直非均匀、各向异性并含热源的平面平行介质中的辐射传输问题,其波谱可覆盖紫外—微波波段,计算包括了热辐射、散射、吸收、下边界双向反射和发射等物理过程。

3 SBDART 程序的结构

软件包结构由1个主程序和31个模块式的子程序组成。程序逻辑很清晰,便于用户的理解、增删、修改和移植。主程序SBDART的主要功能是输入控制参数、赋初值以及结果的输出。另外,它还调用了31个子程序,表1为各个子程序的功能。在SBDART模式中输入文件可以定义大约60个初始参数和12种输出结果,其中主要的输入控制参数有:

ISALB:表面反照率特征值,ISAT:滤波函数种类,WLINC:光谱分辨率,IDATM:大气廓线类型,ZCLOUD:云层的高度(km),TCLD:云层的光学厚度,NRE:云滴的有效粒子半径(μm),JAER:平流层气溶胶种类,IAER:边界层气溶胶种类,SZA:太阳天顶角(缺省为0),TIME:格林尼治时间,ALAT:地面该点的纬度,ALON:地面该点的经度。

4 应用实例

飞机积冰是指当飞机在含有过冷却水滴的云层中飞行,机体表面温度达到零摄氏度以下时,机身表面一些部位产生冰层聚积的现象。飞机积冰会使飞机的空气动力学性能恶化,表现为升力减小,阻力增大,增加飞行的油耗,妨碍静压系统仪表指示,严重影响飞机的安定性和操纵性,是一种航空危险天气。飞机潜在积冰区的识别一直以来都采用传统的观测、探测资料。1992年美国国家大气研究中心

(NCAR) 提出了解决积冰强度判识的积冰严重性指数 I_n 方法, 该方法利用液态水含量、温度以及云滴的中位数体积直径这 3 个与积冰关系密切的云参数来识别飞机潜在积冰区及其强度等级, 其效果得到飞机观测实验的验证^[7]。

由于 EOS/MODIS 卫星高分辨率资料的 CH_1 ($0.64\mu\text{m}$) 云的反射函数主要依赖于云的光学厚度, CH_{20} ($3.75\mu\text{m}$) 云的辐射值主要依赖于云滴的有效半径^[8], 所以可以分别用两个通道的资料并结合 SBDART 模式来反演云的光学厚度和有效粒子半径, 再利用 NCAR 提出的积冰严重性指数 I_n , 实现对飞机积冰区域的有效识别。

表 1 SBDART 子程序功能

程序	用途
Absgas	计算传输气体吸收资料
Absint	对整个气层计算各种气体的吸收量
Atms	选择不同的大气廓线
Beamset	当指定气溶胶相函数时建立大气单次散射反照率因子
Chkin	检查输入参数
Chkprn	诊断输出结果
Cloudpar	计算云层的辐射传输特性(单次散射反照率等)
Depthscel	根据 DISORT 模式的输入参数计算辐射特性
Disort	解决多流辐射传输
Getmom	计算相函数
Kdistr	计算 k 分布参数
Modatm	根据用户输入的参数修改大气廓线
Modmix	修改大气中 N_2 、 O_2 、 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 、 CO 、 NO_2 、 SO_2 、 NH_3 、 NO 、 NHO_3 的体积混合比
Openckf	当被指定时打开诊断输出文件
Rayleigh	计算分子 rayleigh 散射光学厚度
Stdaer	建立标准边界层气溶胶模式中的消光系数、非对称因子、单次散射反照率
Saturate	设置云层的相对湿度
Suralb	选择不同地表类型的表面反照率
Setfilt	选择滤波函数种类
Stdout0	输出头文件
Stdout1	设置输出信息
Stdout2	设置输出信息
Satcloud	修改云层内部水汽密度
Tauaero	计算边界层气溶胶和平流层气溶胶在所有大气层的光学厚度和散射特性
Taugas	计算气溶胶光学厚度
Taucloud	计算云辐射特性
Usraer	建立用户定义的边界层气溶胶
Uaerden	定义边界层气溶胶垂直分布
Usrcloud	用户自己定义云特性时, 调用该子程序
Zensun	根据所给的日期和时间计算太阳天顶角和方位角
Zlayer	找到对应高度 z 的计算层

在北京南部地区 400 m 高空遇轻度积冰, 飞机观测到云底高为 100 m, 云顶高为 400 m。22 日 08 时 850hPa 温度和等压面图上(图略), 从呼和浩特至西安有小槽, 北京处于槽前西南气流中, 温度平流为冷平流。在 925hPa 图上, 该低压槽加强延伸至贵阳, 北京受西南气流控制(图略)。22 日 10:37 的 EOS/MODIS 可见光通道的云图显示北京南部地区被低云覆盖(图略)。

对上述个例, 反演过程为:

首先, 将初始的光学厚度和有效粒径代入 SBDART 模式分别计算波长为 $0.64\mu\text{m}$ 和 $3.75\mu\text{m}$ 的辐射值, 并同 40°N , 116°E MODIS 的 CH_1 通道 22 日 10:37 的反照率及 CH_{20} 通道辐射值对比, 判断模式的计算值同 MODIS 遥感辐射值的偏差是否达到了给定的极小值; 若没有则迭代生成新的光学厚度和有效粒子半径, 再利用模式进行计算, 直到判据达到要求为止。经过反复迭代, 得到当模式输入的光学厚度为 $5\mu\text{m}$ 和有效粒子半径为 $87\mu\text{m}$ 时, 模式的计算同 MODIS 遥感信息辐射值的偏差达到极小值。图 1 为达到极小值时 SBDART 模式计算出的 $0.25\mu\text{m}$ 到 $1.0\mu\text{m}$ 的辐射通量密度值。上述计算过程中, SBDART 模式的主要输入参数为: 控制模式计算谱分辨率的参数 WLINC 步长为 $0.005\mu\text{m}$; 参数 IDATM 采用了副极地冬季大气模式; 云底高设为 100 m, 云顶高设为 400 m。

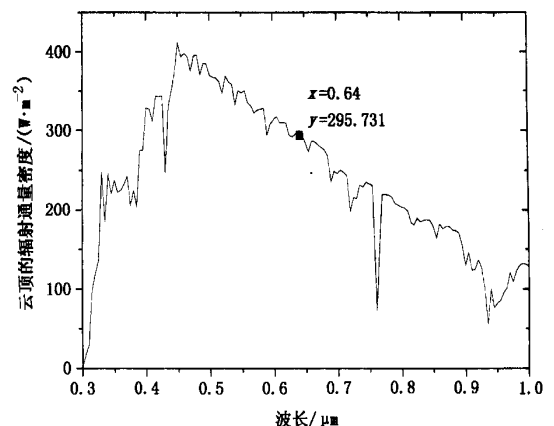


图 1 SBDART 模式计算的辐射通量密度值

其次, 通过 SBDART 模式直接得到云层平均消光系数并根据已经反演出的有效粒子半径计算出云层的液态水含量, 从而确定云滴谱分布, 得到该谱形的中位数体积直径^[9]。通过计算得到: 云层的平均

消光系数 β 为 0.849 , 平均液态水含量 W 为 $0.034\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均温度 t 为 $-3.3\text{ }^\circ\text{C}$, 云滴的平均中位数体积直径 D_M 为 $42.42\mu\text{m}$ 。

最后,根据液态水含量、温度以及云滴的中位数体积直径计算积冰严重性指数。诊断结果为该区域有轻度积冰存在,与飞机报告相吻合。

5 总结

SBDART 模式是一种用途广泛、使用方便、精度较高的大气辐射传输模式。与以前的大气辐射传输模式相比,SBDART 模式有以下特点:

(1) SBDART 模式采用多流辐射传输计算方法,引入了包括多次散射的辐射传输计算,采用改造的累加法自海平面开始向上直到大气上界,逐层确定大气分层的每一界面上的综合透过率、吸收率、反射率和辐射通量,其中包括整层大气和地表、云层反射贡献在内。而以往的大气辐射传输模式在处理散射问题时的二流近似限制了其计算精度。

(2) SBDART 模式采用 3D Monte-Carlo 辐射传输模式解决一些复杂的辐射传输问题。它的突出优点是能够处理任意几何形状下的辐射传输问题,也能处理任意单次散射反照率和各向异性很强的散射相函数,而其他辐射传输解法在这方面有一定的局限性。

(3) 以往的辐射传输模式由最初的 FORTRAN4 语言到 FORTRAN77 语言混杂组成,因而有些非模块结构,子程序内部也非完全结构化。数据交换复杂,数据的读入分散在多个子程序中,各部分参数不完全统一,这些都给分析和修改带来困难。而 SBDART 模式采用了现代标准的软件设计思想,模块化的结构避免了过多使用数据共用存储单元和数据

块子程序。子程序覆盖了广泛的大气物理辐射传输问题,其中包括大量的注释语句用来描述各个子程序的目的、方法以及输入输出参数。具有极强的可读性和可开发性。

(4) 利用 SBDART 模式结合卫星资料反演出云的光学厚度、有效粒子半径及消光系数,可以实现对飞机积冰区域的有效识别,并且诊断结果与飞机观测结果相一致。

参考文献

- 1 Kneizys F X, Shettle E P, Gallery W O, et al. Atmospheric transmittance/radiance: Computer code LOWTRAN 6. Air Force Geophysical Laboratory, 1983, Rep. AFGL-TR-830187:200
- 2 Berk A, Bernstein L W and Robertson D C. MODTRAN: A moderate resolution model for LOWTRAN 7. Air Force Geophysical Laboratory, 1983, Rep. AFGL-TR-83-0187:261
- 3 Ricchiuzzi P, Gautier C. Investigation of the effect of surface heterogeneity and topography on the radiation environment of Palmer Station, Antarctica, with a hybrid 3D radiative transfer model. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103:6161-6176
- 4 Ricchiuzzi P. SBDART: A research and teaching software tool for plane parallel radiative transfer in the earth's atmosphere. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, 79:2101-2114
- 5 Clatchey Mc, Fenn R W and Selby J E A. Optical properties of the atmosphere. *AFCRL Environ. Res.*, 1972, 411:108
- 6 Stamnes K, Tsay S and Wiscombe W. Numerically stable algorithm for discrete ordinate method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. *Appl. Opt.*, 1988, 27:2502-2509
- 7 Politovich M K, Sand W R A. Proposed Icing Severity Index Based Upon Meteorology. 4th International Conference on Aviation, 1992, June:24-27
- 8 King M D, Kaufman Y J, Menzel W P. Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). *IEEE Trans. Geos. Rem. Sens.*, 1992, 30:2-27
- 9 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学. 北京:气象出版社, 1989. 175-177

SBDART RADIATIVE TRANSFER MODEL AND ITS APPLICATION IN RETRIEVAL OF POTENTIAL AIRCRAFT ICING AREA

Wang Xinwei Bai Jie Liu Jianwen Li Wei

(Beijing Aviation Meteorological Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: SBDART is a popular model to compute plane-parallel radiative transfer in recent years. The model is designed for the analysis of a wide variety of radiative transfer problems encountered in (下转 146 页)

(上接 155 页)

satellite remote sensing and atmospheric radiation energy balance studies . The program is based on a collection of well tested and advanced physical models , which were developed over the past few decades in research practice . The function and structure of SBDART are introduced briefly in the paper . The SBDART model is combined with satellite data to obtain optical thickness of cloud and cloud drop effective radius , as well as extinction efficiency , in this way , recognition of aircraft icing is realized .

Key words : radiative transfer model , SBDART , aircraft icing