

用离散坐标法检验 LOWTRAN 的 辐射传输计算

吴北婴

吕达仁

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

提 要

本文对比了用辐射传输程序 DISORT 和 LOWTRAN 计算的 $3-5\ \mu\text{m}$ 波段中 $2000-2020\ \text{cm}^{-1}$, $2300-2320\ \text{cm}^{-1}$ 及 $0.55\ \mu\text{m}$ 区的 $18180-18200\ \text{cm}^{-1}$ 段的地面向下及大气顶部向上漫射通量和光强, 从而对 LOWTRAN 和 DISORT 两个计算程序的精度进行了分析和考察。

关键词: 辐射传输模式; 辐射计算精度; LOWTRAN; DISORT

一、引 言

在遥感方面应用较为广泛的一个低分辨率辐射传输程序包是美国空军地球物理实验室 (AFGL) 的 LOWTRAN^[1]。该程序包最初是用于计算大气的吸收气体的透过率, 近年来, 加进了求解大气的红外、可见波段辐射传输问题的程序, 使应用更加方便。尤其是 LOWTRAN-7 利用了指教拟合 LOWTRAN 的带模式, 并将二流一累加法的多次散射算法引进 LOWTRAN 模式, 使精度有了较大提高^[2]。根据文献[3]的对比结果, 对单层散射大气, 二流近似计算与精确算法(离散坐标法、FN 方法、球谐函数法等)计算的通量误差可达到 10%, 随光学厚度的增加和单次散射反照率的减小, 误差有所增加。而不同作者的二流近似及各种变形所得通量之间也可差 10% 的量级。对实际晴空大气, 二流近似所算地面向下漫射通量误差为 10% 左右, 但大气顶部的向上反射通量误差可达 40-50%, 甚至 90%。随太阳天顶角的增加, 误差有增加的趋势。另外, 近年来 Stamnes 等人^[4]发展了一个离散坐标法计算程序包——DISORT。该程序包对传统的基于 Chandrasekhar 公式的计算方法作了改进, 用标准矩阵解法直接由齐次微分方程组求特征值, 提高了计算效率。这一程序包曾经过广泛的检验及与标准算法的对比, 可认为较精确。本文从几个常用谱区选取相同谱宽作为例子来计算, 比较和分析了这两种不同算法计算结果的差异, 以引起对这类对比工作的进一步重视。

1992 年 8 月 27 日收到, 12 月 7 日收到修改稿。

二、计算方法

LOWTRAN-7 在处理散射问题时, 把 20cm^{-1} 波段内的各层大气透过率用有限项指数和表示:

$$T(u_p) = \sum_{j=1}^k D_{pj} \exp(-k_j u_p),$$

其中 $k_j = k_a + k_m + k_{\text{gas},j} + k_c$, p 为第 p 层, k_a 为气溶胶消光系数, k_m 为分子散射系数, k_c 为气体连续吸收系数, $k_{\text{gas},j}$ 为水汽、臭氧及均匀混合气体的吸收系数。若求出相应各 k_j , ω_j 和 $\tau_{jp} = k_j u_p$ 的各层通量 F_{pj} , 则总通量为

$$F(\tau_p) = \sum_{j=1}^k D_{pj} F_{pj}(\tau_p). \quad (1)$$

在 LOWTRAN 中, 用二流近似和累加法求出观测点接收的光强。在我们的对比中, 除上述计算外, 还利用 LOWTRAN 输出了大气顶部的太阳谱常数、 D_{pj} 分布及相应的伪光学厚度、单次散射反照率, 将这些量代入离散坐标法的程序, 求出相应的光强 I_{pj} 和通量 F_{pj} , 用 (1) 式求和, 得到 $I(u_p)$ 和 $F(u_p)$, 与 LOWTRAN 对比。这样, 两种计算建立在同样的大气模式下, 差别仅在于对辐射传输的处理。

三、对比结果

采用美国标准大气, 地面反照率为 0.2, 太阳天顶角的余弦为 0.90 (大致相应于中纬度夏季), 气溶胶为乡村 (rural), 能见度 23km, 相函数为 Henyey-Greenstein 相函数, 非对称因子为 0.75, 考虑了水汽、臭氧、二氧化碳的吸收。分别计算了 $3-5\mu\text{m}$ 波段中 $2000-2020\text{cm}^{-1}$, $2300-2320\text{cm}^{-1}$ 及 $0.55\mu\text{m}$ 区的 $18180-18200\text{cm}^{-1}$ 段的地面向下及大气顶部向上漫射通量。这三段中 $2300-2320\text{cm}^{-1}$ 段处于二氧化碳 4.3 微米强吸收带, $2000-2020\text{cm}^{-1}$ 段为中等强度的吸收并有散射存在, 而 $18180-18200\text{cm}^{-1}$ 段基本没有大气吸收, 散射占优势。同时对 $2400-3400\text{cm}^{-1}$ 的谱区考察了谱段间隔划分, 大气模式厚度对计算结果的影响。主要结果如下:

1. 地面向下通量和光强

离散坐标法计算的地面向下漫射通量均大于 LOWTRAN 计算结果 (表 1), 原因

表 1 离散坐标法和 LOWTRAN 计算的地面向下漫射通量

F_l : LOWTRAN, F_d : 离散坐标法 ($\times 10^{-5}\text{W}/\text{cm}^2$)

波段(cm^{-1})	F_l	F_d	$(F_d - F_l) / F_d$
2000—2020	1.696	3.583	0.53
2300—2320	0.795	1.740	0.54
18180—18200	2.863	3.269	0.12

在于离散坐标法较完整地处理了多次散射。LOWTRAN 程序在散射占优势的谱区与离散坐标法结果较为接近,而在散射与吸收并存时与离散坐标法结果差别较大。

同时比较了太阳所在子午面上(即 $\varphi = 0^\circ$)每隔 15° 的辐射光强(表 2)。表中角度定义为光线正方向的天顶角。

表 2 离散坐标法和 LOWTRAN 计算的地面向下漫射光强
 I_l : LOWTRAN, I_d : 离散坐标法, $\varphi = 0^\circ$ (单位: $\times 10^{-5} \text{ W/cm}^2\text{ster}$)

角度($^\circ$)	2000—2020 cm^{-1}		2300—2320 cm^{-1}		18180—18200 cm^{-1}	
	I_l	I_d	I_l	I_d	I_l	I_d
90	0.796	1.568	0.2646	0.5552	0.920	0.594
105	0.680	1.408	0.2531	0.5548	0.937	1.711
120	0.585	1.219	0.2531	0.5542	1.084	2.357
135	0.529	1.101	0.2531	0.5536	2.087	2.702
150	0.508	1.028	0.2531	0.5532	5.135	2.677
165	0.478	0.987	0.2531	0.5529	3.059	2.299
180	0.462	0.973	0.2531	0.5528	0.989	1.668

可见,两种算法所算光强随角度的分布趋势一致。在散射占优势的大气中,计算的光强在接近太阳的角度最大,随距太阳角度增大而减小。而在吸收占优势的大气中,光强在天顶方向最小随天顶角增大而单调增加。

2. 大气顶部向上通量及光强

离散坐标法计算的大气顶部向上漫射通量与 LOWTRAN 计算结果比较见表 3。与地面向下通量的结果类似,LOWTRAN 程序在散射占优势的谱区与离散坐标法结果较为接近,而在散射与吸收并存时与离散坐标法结果差别较大。

表 3 离散坐标法和 LOWTRAN 计算的大气顶部向上漫射通量
 F_l : LOWTRAN, F_d : 离散坐标法 (单位: $\times 10^{-5} \text{ W/cm}^2$)

波段(cm^{-1})	F_l	F_d	$(F_d - F_l) / F_d$
2000—2020	1.637	3.538	0.54
2300—2320	0.028	0.060	0.53
18180—18200	2.059	1.877	-0.096

太阳所在子午面上(即 $\varphi = 0^\circ$)每隔 15° 的辐射光强见表 4。表中角度定义为光线正方向的天顶角。

一般来说,两种算法所算光强随角度的分布趋势一致。在吸收占优势的大气中,光强在天顶方向最小,随天顶角增大而单调增加。但对 18180—18200 cm^{-1} 波段,两种算法的光强分布趋势不一致,LOWTRAN 所给光强在 30° 达到极小值而 DISORT 在此处达到极大。

表 4 离散坐标法和 LOWTRAN 计算的大气顶部向上漫射光强

 I_1 : LOWTRAN, I_d : 离散坐标法, $\varphi = 0^\circ$ (单位: $\times 10^{-5} \text{ W} / \text{cm}^2 \text{ster}$)

角度($^\circ$)	2000—2020 cm^{-1}		2300—2320 cm^{-1}		18180—18200 cm^{-1}	
	I_1	I_d	I_1	I_d	I_1	I_d
0	0.586	1.250	0.00860	0.01796	0.641	0.488
15	0.582	1.244	0.00862	0.01803	0.634	0.715
30	0.569	1.222	0.00868	0.01824	0.630	0.826
45	0.542	1.177	0.00881	0.01864	0.634	0.734
60	0.491	1.090	0.00907	0.01934	0.658	0.439
75	0.370	0.904	0.00961	0.02058	0.736	0.951

四、结 论

LOWTRAN 计算的光谱积分的辐射通量与离散坐标法计算结果较接近, 但多数情况下比离散坐标法的结果偏小。辐射通量最大可偏小 50%。作为一般通量计算, LOWTRAN 可给出量级上正确的结果。但在散射和吸收并存的情况下, LOWTRAN 计算通量的精度和适用性需作进一步检验。除大气顶部向上漫射光强在 18180—18200 cm^{-1} 波段分布趋势不一致外, 两个程序所得光强随角度的分布趋势一致。

参 考 文 献

- [1] Kneizys, F. X., E. P. Shettle et al., 1988, *User's Guide to LOWTRAN 7*, AFGL-TR-88-0177.
- [2] Isaacs, R. G., W. C. Wang, R. D. Warshaw and S. Goldenberg, 1987, Multiple Scattering LOWTRAN and FASCOD Models, *Appl. Opt.*, 26(7), 1272-1281.
- [3] Lenoble J. ed., 1985, *Radiative Transfer in Scattering and Absorbing Atmospheres: Standard Computational Procedures*, A. Deepak Publishing.
- [4] Stamnes, K., S-Chee Tsay, W. Wiscombe and K. Jayaweera, 1988, Numerically Stable Algorithm for Discrete-ordinate-method Radiative Transfer in Multiple Scattering and Emitting Layered Media, *Appl. Opt.*, 27(12), 2502-2509.

Calculation of Radiative Flux and Radiance by the Discrete Ordinate Method and the Comparison with LOWTRAN Calculation

Wu Beiyong and Lu Daren

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

Abstract

The downward and upward fluxes and radiances at the surface and at the top of the atmosphere in

the wavelength intervals of $2000\text{--}2020\text{ cm}^{-1}$, $2300\text{--}2320\text{ cm}^{-1}$, $18180\text{--}18200\text{ cm}^{-1}$ calculated by the DISORT and LOWTRAN codes, respectively are compared in this paper. The computational accuracy of these two codes is discussed by this comparison.

Key words: radiative transfer, accuracy of the radiation calculation, discrete-ordinate-method, two-stream-approximation.

中国科学院“八五”重大应用项目“灾害性气候的 预测及其对农业年景和水资源调配的影响” 1993 年年会在湖南省召开

中国科学院“八五”重大应用项目“灾害性气候的预测及其对农业年景和水资源调配的影响”1993 年度学术年会, 于 1993 年 10 月 21 日—26 日在湖南省大庸市索溪峪召开。参加会议的有该项目顾问、中国科学院学部委员陶诗言, 特邀代表王绍武教授, 承担本项目的研究人员, 有关部门负责人等共计 95 人。

这次会议共收到学术论文摘要 96 篇, 其中 40 篇论文在大会上作了交流。这些论文基本上反映了项目下属的 5 个课题所得到的研究成果。

在第一课题的研究中, 确定了研制“中国气候灾害图集”的方案, 并完成了三年 (1978、1979、1980) 的样图初稿, 对我国七种气候灾害的定义、指标及其时空分布特征进行了系统、详细的分析。

在第二课题的研究中, 揭示了我国东亚冬季风环流异常与我国江淮流域夏季旱涝之间相互联系的事实, 并初步探讨了它们之间相互联系的物理过程。指出了亚澳季风以及南北方涛动之间的关系, 提出了 ENSO 形成的一种新的可能机制, 进一步分析了黑潮、青藏高原积雪对旱涝形成的作用。

在第三课题的研究中, 在动力框架、物理过程初值形成、集合预报、信息提取等方面, 发展、完善或建立了预报模式和改进了预报方法; 在综合预报研究方面, 通过各种途径, 使用从简单环流模式、距平模式到复杂的 GCM、CGCM 和以陆面过程、西太平洋暖池、亚洲大陆积雪等为主要依据的物理预报方法, 进行了月的和季度的预报试验和检验; 对 1993 年汛期降水做了实际预测试验, 与实际相比较, 取得了较好的预测结果, 在全国汛期会商时发挥了作用。

在第四课题的有关农业年景研究中, 分析了小麦或水稻各个生长期的气象条件, 并建立了相应的框图和表格; 找出了农作物在各个生长期影响产量的主要气候灾害; 制作了产量预测模式, 并能定期发布产量预报, 效果良好。在水资源调配研究方面也取得了一些进展, 能定期向新安江电厂、龙羊峡水库、葛洲坝水库提供预报。

在第五课题的工作中, 收集了大量可供灾害性气候研究和预测使用的数据资料, 完成了质量控制的试验研究; 还根据我国 40 年的温度降水资料, 研究了它们的年代际变化趋势, 结果表明近来影响我国的季风减弱, 并伴随着干旱化。

会议除肯定了项目在前一阶段的成绩外, 还对研究工作中存在的问题, 各课题今后的研究重点和主攻方向等进行了深入的讨论和研究。会议指出, 要完成项目原定技术经济指标, 还要通过艰苦的努力, 今后两年特别要注意研究工作应切实符合合同书上所定内容, 并注意研究的先进性与可在灾害性气候预测上应用。

(张人禾)