

离散坐标法和 LOWTRAN7 辐射 传输计算的比较

汪宏七 赵高祥

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

摘要 在不同波段和不同大气条件下, 利用离散坐标法和 LOWTRAN7 计算了大气顶向上和地面向下辐射率, 并进行了比较. 在一般情况下, 两者的差别小于 20%, 说明用 LOWTRAN7 计算有较好的精度.

关键词 离散坐标法, LOWTRAN, 辐射传输, 辐射率.

引言

美国空军地球物理实验室(ARGL)的低分辨率辐射传输计算程序 LOWTRAN 最初只用于计算大气透过率, 后发展到既可以计算包括不同模式气溶胶和云在内的各种大气条件下紫外到微波的大气透过率, 又可以进行考虑多次散射影响的辐射率的计算^[1], 为此它在辐射传输和遥感等工程和研究领域得到了广泛的应用. 文献[2]通过选择宽度为 20cm^{-1} 的 3 个波段对 LOWTRAN7 的辐射计算进行了检验, 得到的辐射通量与离散坐标法(DISORT)^[3]计算结果的偏差为 50%, 而与方向有关的辐射率的差别则更大. 我们利用 LOWTRAN7 程序, 在与文献[2]同样的大气条件下和同样的波段上进行计算, 与离散坐标法作了对比, 得到了较好的结果, 其辐射率差别一般都小于 20%. 本文给出了我们的计算结果, 同时还给出其它波段和不同大气条件下对比的结果, 并进行了讨论, 可供利用 LOWTRAN7 程序在不同的实际应用中进行辐射传输计算的同行参考.

1 计算方法

LOWTRAN7 程序的光谱分辨率为 20cm^{-1} . 对于水汽连续吸收、氮气连续吸收, 以及紫外和可见波段的臭氧吸收, 20cm^{-1} 的平均透过率用朗伯定律计算; 在其余的气体吸收带, 均采用双指数经验公式

$$T_R(\gamma) = \exp \left\{ - \left[c(\gamma) u \left(\frac{P}{P_0} \right)^\alpha \left(\frac{T_0}{T} \right)^\beta \right]^a \right\} \quad (1)$$

计算 20cm^{-1} 间隔的平均透过率, 其中经验参数 $C(\gamma)$ 、 α 、 β 、 a 由逐线计算和实验测量得到. 在大气中多种成分同时有吸收的波段, 假设各种气体吸收不相关, 则总透过率为各种成分透过率之积. LOWTRAN7 大气透过率计算的精度一般可达到 10%.

在计算光学厚度为 τ 的高度上, 视角天顶角 θ 的余弦为 μ 、方位角为 φ 的方向上, 向上的和向下的辐射率 $I^\uparrow(\tau, \mu, \varphi)$ 和 $I^\downarrow(\tau, -\mu, \varphi)$ 时, 在 LOWTRAN7 中分别为^[4]

$$\begin{aligned} I^\uparrow(\tau, \mu, \varphi) = & \frac{r}{\pi} \pi F_0 \mu_0 T_R(\tau^*, \mu_0) \cdot T_R(\tau^* - \tau, \mu) \\ & + \frac{r}{\pi} \iint I(\tau^*, -\mu, \varphi) \mu d\mu d\varphi \cdot T_R(\tau^* - \tau, \mu) \\ & + (1-r)B[T(\tau^*)] \cdot T_R(\tau^* - \tau, \mu) \\ & + \int_\tau^{\tau^*} J(t, \mu, \varphi) T_R(t - \tau, \mu) \frac{dt}{\mu}, \end{aligned} \quad (2)$$

$$I^\downarrow(\tau, -\mu, \varphi) = \int_0^\tau J(t, \mu, \varphi) \cdot T_R(\tau - t, \mu) \frac{dt}{\mu}, \quad (3)$$

式中 πF_0 为大气外太阳光谱辐照度, μ_0 为太阳天顶角余弦, r 为地表反照率, τ^* 为大气整层光学厚度, T 为大气温度, $B(T)$ 为黑体辐射, $T_R(\tau, \mu)$ 为 μ 方向、 τ 厚度的斜程透过率, J 为源函数, 其表达式为

$$\begin{aligned} J(\tau, \mu, \varphi) = & \frac{\omega_0(\tau)}{4\pi} \pi F_0 T_R(\tau, \mu_0) P(\Omega, -\Omega_0) \\ & + [1 - \omega_0(\tau)] B[T(\tau)] \\ & + \frac{\omega_0(\tau)}{4\pi} \int_\Omega P(\Omega, \Omega') I(\tau, \Omega') d\Omega'. \end{aligned} \quad (4)$$

上述公式中的多次散射量, 即式(2)中右边第 2 项和源函数表式(4)中右边第 3 项, 是采用二流——累加法计算大气中各高度上的辐射通量来近似得到的^[4].

在 $0.202 \sim 0.56\mu\text{m}$ 波段, 每个 20cm^{-1} 的间隔被当作一个单色辐射来处理. 在其它气体吸收带, 透过率 $T_R(\tau, \mu)$ 由式(1)计算得到. 在计算多次散射项时, 对 20cm^{-1} 间隔上的透过率进行有限项指数和拟合; 将问题化作几个假单色辐射处理.

$$T_R(u) = \sum_j D_j \exp(-k_j u). \quad (5)$$

离散坐标法是一种能精确处理多次散射的辐射传输计算方法^[3], 用于散射吸收大气的单色辐射传输计算. 本文用来与 LOWTRAN7 程序的辐射计算作比较. 对于 $0.202 \sim 0.56\mu\text{m}$ 波段, 两种方法都采用 LOWTRAN7 的 20cm^{-1} 平均吸收系数, 当所采用的其余参数都一致时, 两种结果的差别反映了两种方法对辐射传输计算处理不同的差别, 反映出 LOWTRAN7 中应用二流——累加法近似计算多次散射量的误差. 对于其它波段, 离散坐标法采

用 LOWTRAN7 中有限项指数和拟合式(5)得到的伪单色光学厚度和权重进行计算. 在计算中使用的大气的其它参数完全一样时,两种结果的差别除反映两种方法对辐射传输计算的处理不同外,也反映了 LOWTRAN7 中有限项指数和拟合的精度. 这是因为 LOWTRAN7 辐射率计算中的透过率直接使用了双指数经验公式.

离散坐标法虽是一种精确的辐射传输计算方法,但它的计数精度与计算时采用的流数有关. 当流数较小时,计算的精度较低,特别是进行与方向有关的辐射率计算时,当有限项多项式求和得到的散射相函数不能较好描述相函数的实际分布时,辐射率的值误差较大,甚至可能为负值. 因此,散射相函数的展开项数应取得足够多. 在散射吸收大气中,可以应用较小的流数、较多相函数展开项数来计算得到足够精确的辐射率^[5],但在纯散射大气中,流数必须与展开项数一样大,才能得到正确的结果.

2 计算结果讨论

选择 $2000-2020\text{cm}^{-1}$ ($5\mu\text{m}$)、 $2480-2500\text{cm}^{-1}$ ($4\mu\text{m}$)、 $8800-8820\text{cm}^{-1}$ ($1.13\mu\text{m}$)、 $18180-18200\text{cm}^{-1}$ ($0.55\mu\text{m}$)和 $29400-29420\text{cm}^{-1}$ ($0.34\mu\text{m}$)等波段,对于美国标准大气,当气溶胶相函数采用不对称因子为 0.75 的 Henyey-Greenstein 相函数,大气气溶胶在对流层为地面能见度 23km 的乡村大陆气溶胶(TR23)、平流层为背景气溶胶(BSA),太阳天顶角余弦为 0.9,地面反照率为 0.2 和太阳在日地平均距离时,用离散坐标法和 LOWTRAN7 分别计算了太阳所在子午面上几个天顶角方向,大气顶向上的辐射率和地面向下的辐射率. 用离散坐标法计算时,取流数为 32,计算结果及两种方法的相对偏差见表 1. 对 $18180-18200\text{cm}^{-1}$ 波段,还给出了太阳在天顶角余弦为 0.5 和大气比较混浊,在对流层能见度为 5km 的乡村气溶胶(TR5),在平流层为高浓度新火山灰气溶胶(VSA)时的结果. 由表 1 可见,在所考察的几组情况中,除个别波段在视角天顶角接近 90° 的方向外,两种方法所算得的各方向辐射率大部分相差在 20% 以内,通常,在天顶角较大的方向上差别大些.

在 $2000-2020\text{cm}^{-1}$ 红外波段,分子散射作用很弱,主要受 H_2O 吸收的影响. 当存在能见度为 23km 的乡村气溶胶时,多次散射的贡献不超过 7%. 此时,两种方法计算结果的差别主要不是由 LOWTRAN7 程序中计算多次散射的近似造成的,而是由有限项指数和拟合透过率的精度造成的. 表 2 列出这一波段在分别使用双指数经验公式(1)和有限项指数和公式(5)计算的从大气顶到各高度层 H_2O 的透过率. 表 2 中 T_{R1} 为双指数经验公式, T_{R2} 为指数和拟合公式. 由表 2 可见,式(5)的拟合结果一般很好,但在有些层上两者有一定差别. 在多次散射量贡献较小的情况下,利用 LOWTRAN7 方法计算时,只要计算单次散射量的双指数经验公式透过率足够精确,即使计算多次散射量的近似方法与指数和拟合参数有较大误差,它们对总辐射量的精度也不会造成大的影响,而离散坐标法中所用的经再次拟合得到的伪单色参数的精度则对计算结果会有影响.

表 1 离散坐标法和 LOWTRAN7 计算的地面向下和大气顶向上几个波段在不同方向上的漫射辐射率 I 及相对偏差(美国标准大气,地表反照率为 0.2, $\mu_0=0.9, \varphi=0^\circ$)

Table 1 Surface downward diffuse radiance I^\dagger and upward diffuse radiance I^\ddagger at the top of the atmosphere in different directions in five spectral intervals calculated by the discrete ordinate method and LOWTRAN 7 code, respectively, and their relative deviations (%)

(U. S. standard atmosphere, surface albedo = 0.2, $\mu_0=0.9, \varphi=0^\circ$)

波数(cm^{-1})	2000-2020			2480-2500			8800-8820		
气溶胶模式	TR23+BSA								
μ_0	0.9								
$\theta(^{\circ})$	$I^\dagger(\tau, \theta)$ ($\text{W}/\text{M}^2 \cdot \text{sr}$)								
	LOW7	DISORT	(%)	LOW7	DISORT	(%)	LOW7	DISORT	(%)
180	0.0462	0.04944	-6.5	0.00319	0.00306	4.2	0.01312	0.01387	-5.4
165	0.0479	0.05111	-6.3	0.00834	0.00811	2.8	0.0484	0.04975	-2.4
150	0.0508	0.05414	-6.1	0.01351	0.01317	2.6	0.0795	0.08120	-2.1
135	0.0529	0.05675	-6.7	0.00630	0.00616	2.3	0.0271	0.02866	-5.6
120	0.0584	0.06296	-7.3	0.00436	0.00430	1.4	0.00961	0.01078	-10.8
105	0.0680	0.07358	-7.6	0.00561	0.00575	2.4	0.00471	0.00570	-17.5
90.1	0.0789	0.08466	-6.8	0.01703	0.01755	-3.0	0.00740	0.00393	88.3
	$I^\ddagger(0, \theta)$ ($\text{W}/\text{M}^2 \cdot \text{sr}$)								
	LOW7	DISORT	(%)	LOW7	DISORT	(%)	LOW7	DISORT	(%)
0	0.0587	0.07115	-17.5	0.0228	0.02344	-2.7	0.00987	0.01156	-14.6
15	0.0583	0.07084	-17.6	0.0227	0.02335	-3.0	0.00967	0.01133	-14.7
30	0.0569	0.06984	-18.5	0.0224	0.02303	-2.6	0.00906	0.01066	-15.0
45	0.0542	0.06791	-20.1	0.0217	0.02236	-3.1	0.00796	0.00948	-16.4
60	0.0492	0.06405	-23.2	0.02007	0.02095	-4.2	0.00634	0.00772	-17.9
75	0.0371	0.05512	-32.7	0.01460	0.01721	-15.2	0.00510	0.00601	-15.1
波数(cm^{-1})	29400-29420			18180-18200					
气溶胶模式	TR23+BSA			TR23+BSA			TR5+VSA		
μ_0	0.9			0.9			0.5		
$\theta(^{\circ})$	$I^\dagger(\tau, \theta)$ ($\text{W}/\text{M}^2 \cdot \text{sr}$)								
	LOW7	DISORT	(%)	LOW7	DISORT	(%)	LOW7	DISORT	(%)
180	0.0353	0.0370	-4.6	0.1032	0.1069	-3.5	0.0263	0.0238	10.5
165	0.0718	0.0759	-5.4	0.3210	0.3331	-3.6	0.0369	0.0379	-2.6
150	0.1046	0.1102	-5.1	0.528	0.5457	-3.3	0.0723	0.0815	-11.3
135	0.0527	0.0591	-10.8	0.213	0.2302	-7.4	0.233	0.2619	-11.1
120	0.0358	0.0417	-14.1	0.1114	0.1247	-10.6	0.674	0.7322	-7.9
105	0.0295	0.0351	-16.0	0.0966	0.1137	-15.0	0.409	0.5163	-20.7
90.1	0.0240	0.0246	-2.4	0.0947	0.1094	-13.4	0.1259	0.2481	-49.3
	$I^\ddagger(0, \theta)$ ($\text{W}/\text{M}^2 \cdot \text{sr}$)								
	LOW7	DISORT	(%)	LOW7	DISORT	(%)	LOW7	DISORT	(%)
0	0.0251	0.0265	-5.3	0.0658	0.0670	-1.8	0.0362	0.0375	-3.5
15	0.0243	0.0256	-5.1	0.0651	0.0662	-1.7	0.0363	0.0379	-4.2
30	0.0239	0.0254	-5.9	0.0647	0.0660	-2.0	0.0379	0.0405	-6.4
45	0.0243	0.0261	-6.9	0.0651	0.0671	-3.0	0.0423	0.0476	-11.1
60	0.0261	0.0283	-7.8	0.0673	0.0711	-5.3	0.0540	0.0661	-18.3
75	0.0291	0.0313	-7.0	0.0733	0.0813	-9.8	0.0902	0.1170	-22.9

表 2 LOWTRAN7 中双指数经验公式与有限项指数和公式计算 H₂O 透过率的比较
(2000-2020cm⁻¹)

Table 2 Comparison of transmittance calculated with the empirical double-exponent formula of LOWTRAN 7 and with the exponential sum fit for spectral interval 2000-2020cm⁻¹

层	T_{R1}	T_{R2}	层	T_{R1}	T_{R2}	层	T_{R1}	T_{R2}
1	1.0000	1.0000	12	0.9985	0.9998	23	0.9818	0.9955
2	1.0000	1.0000	13	0.9983	0.9997	24	0.9684	0.9898
3	1.0000	1.0000	14	0.9981	0.9997	25	0.9469	0.9754
4	0.9999	1.0000	15	0.9978	0.9997	26	0.9169	0.9465
5	0.9998	1.0000	16	0.9975	0.9996	27	0.8747	0.8947
6	0.9997	1.0000	17	0.9971	0.9995	28	0.8168	0.8190
7	0.9993	0.9999	18	0.9966	0.9994	29	0.7395	0.7326
8	0.9992	0.9999	19	0.9959	0.9992	30	0.6422	0.6439
9	0.9990	0.9999	20	0.9946	0.9988	31	0.5306	0.5373
10	0.9989	0.9998	21	0.9925	0.9983	32	0.4148	0.4177
11	0.9987	0.9998	22	0.9887	0.9974			

在近红外主要受 H₂O 吸收作用的 8800-8820cm⁻¹波段和受 CO₂ 与 N₂ 连续吸收作用的 2480-2500cm⁻¹波段,两种方法计算结果的差别包括辐射计算方法的不同影响外还有指数和拟合精度的影响在内.结果表明,这两个波段除视角接近 90°的方向外,各个方向辐射率的差别都在 20%以内.

在 18180-18200cm⁻¹(0.55μm)的可见波段,主要受分子瑞利散射和气溶胶散射吸收作用.在 29400-29420cm⁻¹(0.34μm)的紫外波段,主要受 O₃ 吸收和分子散射的作用.在这两个波段,两种方法采用的大气参数完全相同时,计算结果的差别是由辐射率计算方法不同造成的.由表 1 可见,在太阳天顶角不太大,大气比较干净时,在 0.55 和 0.34μm 波段,LOWTRAN7 的辐射计算误差小于 20%.在大气比较混浊时(地面能见度 5km,平流层有新喷发的高浓度火山灰),可见波段的辐射率的偏差小于 25%.在太阳天顶角为 60°时,除视角 90°方向外,偏差也小于 25%.在大多数情况下,LOWTRAN7 的计算值偏小.在视角很大的方向上,离散坐标法考虑的是平面平行大气,没有对地球曲率和大气折射进行考虑,因此在视角天顶角很大的方向上,可能有大的误差,这时对两种方法结果的比较要作分析.

上述分析表明,LOWTRAN7 辐射传输计算结果与离散坐标法结果一般都较一致,而文献[2]给出的偏差较大.

对于散射非常强的有云大气和波长更短的紫外波段的情况也作了比较.表 3 给出 18180—18200cm⁻¹可见波段,当大气中 2.4~3.0km 高度上存在光学厚度为 76.315 的高层云时,以及 O₃ 吸收较强的 32000-32020cm⁻¹(0.312μm)紫外波段,在有云和晴空大气两种情况下比较的结果.大气的其余状况与表 1 相同.结果显示,这两种情况下,LOWTRAN7 的计算有较大的误差.在 0.55μm,云滴几乎没有什么吸收,云的强烈的多次散射使大气顶反射到空间的辐射增加,到达地面的辐射减少.在 0.312μm,O₃ 的吸收和分子散射都很强.由于强烈的多次散射作用,辐射在大气中经过的路径增大,受到的吸收也大,使到达地面和反射回空间的辐射均减少.对这两种情况,LOWTRAN7 程序中对多次散射贡献的近似算法造成了较大误差.

表 3 离散坐标法和 LOWTRAN7 计算的有云和晴空大气中两个波段地面向下和大气顶向上的漫散辐射率 I

(美国标准大气,地面能见度 23km,乡村气溶胶,地表反照率 0.2, $\mu_0=0.9, \varphi=0^\circ$)

Table 3 Surface downward diffuse radiance I^\dagger and upward diffuse radiance I^\ddagger at the top of the atmosphere in two spectral intervals calculated with the discrete ordinate method and LOWTRAN 7 code, respectively, in cloudy and clear atmospheres
(U. S. standard atmosphere, rural aerosol model with surface visibility of 23 km, surface albedo = 0.2, $\mu_0=0.9, \varphi=0^\circ$)

辐射率 ($W/m^2, sr$)	$\theta(^{\circ})$	18180-18200(cm^{-1}) 2.4-3.0km 高层云		32000-32020(cm^{-1}) 无云	
		LOW7	DISORT	LOW7	DISORT
$I^\ddagger(\tau^*, \theta)$	180	0.0926	0.0586	0.00919	0.00455
	165	0.0922	0.0576	0.01635	0.00848
	150	0.0909	0.0545	0.02260	0.01179
	135	0.0877	0.0495	0.01231	0.00654
	120	0.0809	0.0427	0.00879	0.00462
	105	0.0648	0.0340	0.00721	0.00371
	90.1	0.0323	0.0214	0.00591	0.00258
$I^\dagger(0, \theta)$	0	0.1936	0.2860	0.00466	0.00156
	15	0.1916	0.2901	0.00438	0.00142
	30	0.1894	0.2880	0.00404	0.00122
	45	0.1866	0.2829	0.00360	0.00099
	60	0.1814	0.2714	0.00293	0.00071
	75	0.1663	0.2302	0.00168	0.00048

3 结论

(1) 当太阳天顶角不太大,大气不十分混浊时,用 LOWTRAN7 计算辐射率与用精确的离散坐标法计算的结果差别一般小于 20%。

(2) 在有云大气和短紫外波段等多次散射强烈的情况下,LOWTRAN7 的计算结果有较大的误差。

(3) 在利用 LOWTRAN7 程序包中用有限项指数和拟合的各种气体的吸收系数等参数时,应注意它们计算的透过率与双指数经验带模式透过率的差别。

参考文献

- 1 Kneizys F X, Shettle E P, et al. AFGL-TR-88-0177, 1988
- 2 吴北婴,吕达仁. 大气科学, 1994, 18(2), 252-256
- 3 Stamnes K, S-Chee Tsay, Wiscombe W, et al. Appl. Opt., 1988, 27(12), 2502-2509
- 4 Isaacs R G, Wang W C, Warsham R D, et al. Appl. Opt., 1987, 26(7), 1272-1281
- 5 汪宏七,赵高祥,王普才. 科学通报, 1989, (11): 840-842

COMPARISON BETWEEN DISCRETE ORDINATE METHOD AND LOWTRAN7 RADIATIVE TRANSFER CALCULATIONS*

Wang Hongqi Zhao Gaoxiang

(Institute of Atmospheric Physics, Beijing, 100029, China)

Abstract Comparison is carried out between upward radiance at the top of the atmosphere and downward radiance on the ground calculated with the discrete ordinate method and LOWTRAN7 code at some different wavelengths from infrared to ultraviolet under different atmospheric conditions. In general, the difference between them is less than 20%, indicating that the LOWTRAN7 code has rather good accuracy in radiance calculations.

Key words discrete ordinate method, LOWTRAN, radiative transfer, radiance.

*The Key Project of National Fundamental Research supported by the National Natural Science Foundation of China.