

地球大气透过率及辐射率计算

吴 晓

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

提 要

文章介绍了一种比较简单实用的地球大气的光谱透过率和到达大气层顶的红外辐射率的计算模型, 光谱波长从 $4 \mu\text{m}$ 到 $\infty \mu\text{m}$, 吸收气体 H_2O 、 CO_2 、 O_3 的吸收计算采用 Elsasser 带模式及其经验参数, H_2O 的连续吸收公式是美国 LOWTRAN-6 计算程序的水汽连续吸收经验公式. 透过率的计算结果与 LOWTRAN 计算结果相一致. 以这种透过率简化模型为基础, 建立了辐射传递正演计算模型, 开发了相应软件, 并用于卫星遥感射出长波辐射的资料处理中, 取得了良好结果.

关键词: 大气透过率 辐射率 射出长波辐射

1 大气透过率的计算模型

本文计算中取光谱间距为 10 cm^{-1} , 计算分子带吸收、气溶胶消光、 H_2O 分子连续吸收的大气平均透过率, 分子带吸收由 H_2O 、 O_3 和大气均匀混和气体 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 各自的透过率组成. 10 cm^{-1} 波数范围内的分子带吸收平均透过率由下列公式表示^[1]:

$$\tau = f(k \cdot w^*) \quad (1)$$

式中, k 是与波数相关的吸收系数, w^* 是气体分子的有效吸收量, 如下式表示:

$$w^* = w \cdot \left(\frac{p_s}{p_0}\right) \cdot \left(\frac{T_0}{T_s}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

w 是吸收气体的实际含量(用 g 或 cm 表示), $p_0=1$ 个大气压, $T_0=293.16 \text{ K}$.

水汽分子的连续吸收系数^[2]:

$$k_c(r) = \rho_s \cdot r \cdot \tanh(hcr/2kT) \cdot \left[\left(\frac{\rho_s}{\rho_0}\right) \cdot \tilde{C}_s(r, T) + \left(\frac{\rho_f}{\rho_0}\right) \cdot \tilde{C}_f(r, T) \right] \quad (3)$$

$$\text{函数 } \tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (4)$$

ρ_s 是水汽数密度, ρ_f 是其它气体的数密度, ρ_0 是 STP(气压 1013 hPa、气温 296 K)状态下的空气数密度.

分为 N 层的大气柱的水汽连续吸收率则为:

$$\sum_{i=1}^N \int_i k_c(r) ds = C_s(r, 296) \sum_{i=1}^N \int_i \left(\frac{\rho_i}{\rho_0}\right) \rho_i ds + [C_s(r, 260) -$$

* 1996-06-28 收到, 1997-09-18 收到再改稿.

$$C_i(r, 296) \left] \sum_{i=1}^N \left(\frac{296 - T_i}{296 - 260} \right) \int_i \left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right) \rho_i ds + C_f(r, 296) \sum_{i=1}^N \int_i \left(\frac{\rho_i}{\rho_0} \right) \rho_i ds \quad (5)$$

式中,

$$C_i(r, 296) = r \cdot \tanh(hcr/2k(296)) \cdot \tilde{C}_i(r, 296)$$

$$C_i(r, 260) = r \cdot \tanh(hcr/2k(260)) \cdot \tilde{C}_i(r, 260)$$

$$C_f(r, 296) = r \cdot \tanh(hcr/2k(296)) \cdot \tilde{C}_f(r, 296)$$

$C_i(r, T)$ 、 $C_f(r, T)$ 是水汽自加宽连续吸收系数和外加宽连续吸收系数, \tilde{C}_i 、 \tilde{C}_f 的具体数据见图 1.

垂直大气柱的水汽连续吸收透过率函数:

$$\tau_c = e^{-\sum_{i=1}^N \int A_i(r) ds} \quad (6)$$

大气均匀混和气体 CH_4 、 N_2O 的 $7.6 \mu\text{m}$ 、 $7.8 \mu\text{m}$ 吸收带透过率模式如下^[3]:

$$\tau = e^{-\left(\frac{w^*}{w}\right)^\eta} \quad (7)$$

式中, w 是环境气压 740 mmHg 和气温 300 K, 透过率 $\tau=e^{-1}$ 时的纯吸收气体含量(单位: cm). w^* 是有效吸收含量:

$$w^* = w \cdot \frac{p_z}{p_0} \quad (8)$$

$p_0 = 740 \text{ mmHg}$, w 是 CH_4 、 N_2O 的实际含量, 经验系数 η 取值: CH_4 , $\eta = 0.46$; N_2O , $\eta = 0.48$.

气溶胶消光的透过率函数如下^[4]:

$$\tau = e^{-r \cdot \Delta L} \quad (9)$$

ΔL 是大气路径(km), r 是气溶胶消光系数.

$$r = b + k \quad (10)$$

b 是气溶胶散射系数, k 是气溶胶吸收系数.

2 地球大气辐射模型

对于 $4 \mu\text{m}$ 以上的长波区, 地球表面辐射作为黑体辐射处理, 其辐射率由普朗克函数表示:

$$B(r, T) = \frac{C_1 r^3}{e^{C_2 r/T} - 1.0} \quad (11)$$

式中, r 是波数, $C_1 = 1.191068 \times 10^{-5}$, $C_2 = 1.438833$, $B(r, T)$ 是黑体辐射率(单位:

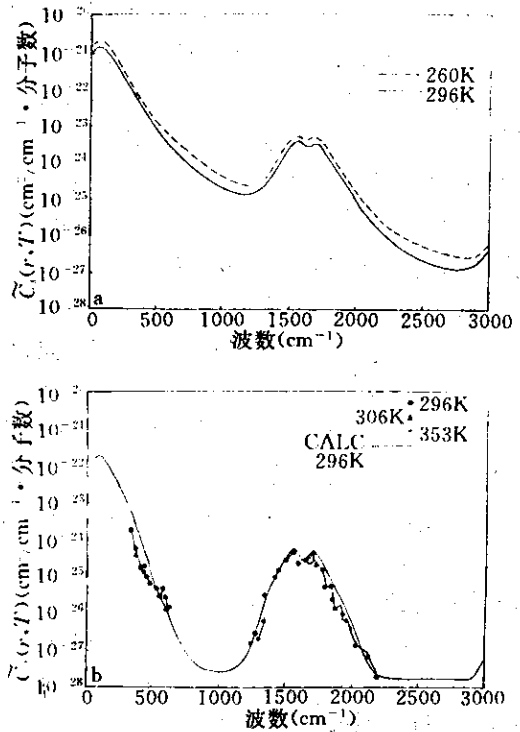


图 1 (a)水汽自身密度决定的连续吸收参数
(b)外密度决定的水汽连续吸收参数

$10^{-7} \text{ J/cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^{-1}$).

穿过地球大气到达外界的辐射率 $B(r, T')$ 由辐射传递积分方程表示:

$$B(r, T') = B(r, T_0) \tau_t^2 + \int_{\tau_a}^1 B(r, T) \tau_s d\tau_a \quad (12)$$

τ_a 是分子吸收透过率, τ_s 是分子散射和气溶胶散射透过率, τ_t^2 是总透过率:

$$\tau_t^2 = \tau_a \cdot \tau_s$$

$B(r, T_0)$ 是地表辐射率.

为简化计算过程, 在辐射传递计算中作了如下处理:

(1) 大气分为 40 层均质层, 从海平面到 60 km, 60 km 以上的大气忽略不计. (2) 折射效应没有包括进大气路径的计算中. (3) 10 cm^{-1} 波数区间的平均透过率用一个特殊的参数化的经验公式表示, 它可表示为吸收系数和有效吸收路径量乘积的函数. (4) 在给定波数的 10 cm^{-1} 区间内的总平均透过率是分子吸收带透过率、气溶胶消光透过率、水汽连续吸收透过率的乘积. (5) 大气的气溶胶模式以能见度 $\text{VIS} < 5 \text{ km}$ 的“雾霾大气”和 $\text{VIS} > 23 \text{ km}$ 的“干洁大气”两类状态为标准. (6) 计算中未考虑散射的影响.

3 大气透过率和辐射率计算结果

大气透过率和辐射率的计算结果举例在图 2 至图 4 中给出.

图 2 表示到达大气层顶的辐射率, 光谱波长从 $4 \mu\text{m}$ 到 $\infty \mu\text{m}$, 计算中使用的是 41.08°N 、 121.07°E 1986 年 1 月 2 日的晴空探空资料, 能见度 5 km.

图 3 表示大气整层的水汽透过率和气溶胶消光透过率, 光谱波长从 $4 \mu\text{m}$ 到 $\infty \mu\text{m}$, 探空资料同图 2, 气溶胶模式是“雾霾大气”模式.

图 4 表示大气整层的 CO_2 气体吸收透过率、 O_3 吸收透过率、 CH_4 气体吸收透过率、 N_2O 气体吸收透过率.

4 应用和讨论

本计算模型是基于美国 AFGL LOWTRAN^[5, 6, 7] 计算结构, 透过率计算的精度、射出长波辐射率计算的精度基本满足要求. 计算中使用的探空资料是 1986 年全球各台站探空资料, 每条廓线的计算结果适用于辐射传递理论方面的应用和卫星遥测资料的模拟,

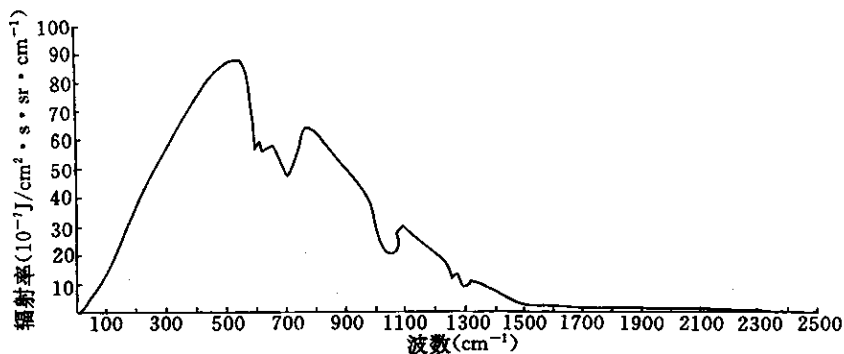


图 2 到达地球大气外界的辐射率光谱(1986 年 1 月 2 日, $p_0 = 1022 \text{ hPa}$, $T_0 = 251.86 \text{ K}$, 晴空, 41.08°N , 121.07°E 探空资料)

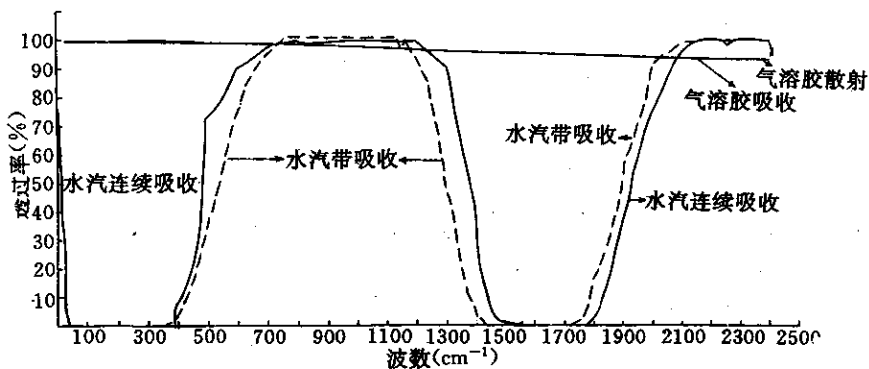


图 3 水汽透过率和气溶胶消光透过率光谱(说明同图 2)

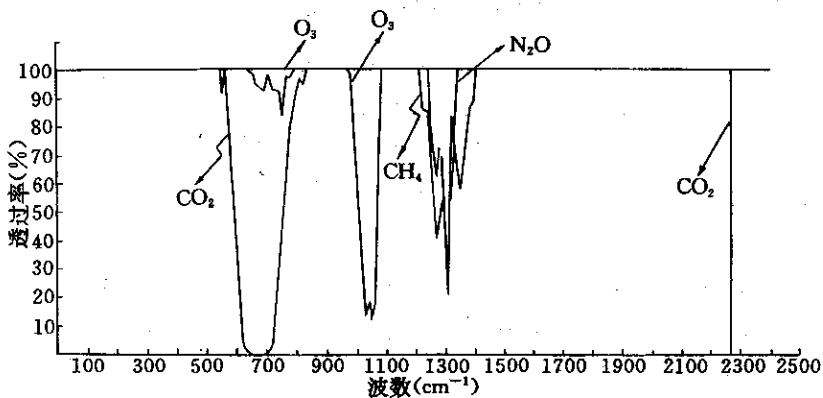


图 4 CO₂、O₃、CH₄ 和 N₂O 透过率光谱(说明同图 2)

基于本模型建立了 NOAA-14、GMS-5 气象卫星的地球窄波段辐射率—长波射出辐射通量密度的辐射转换模式，取得较好效果。利用本计算模型开发出简单实用的辐射传递计算软件，此软件在卫星遥感地气系统射出长波辐射(OLR)资料处理中得到应用，例如卫星遥感资料的临边变暗订正公式^[8]

$$R(0) = R(\theta) + [\alpha_1 + \alpha_2 R(\theta)](\sec\theta - 1) + [\beta_1 + \beta_2 R(\theta)](\sec\theta - 1)^2 \quad (13)$$

式中 $R(0)$ 和 $R(\theta)$ 分别为卫星视角为 0 和 θ 时的测值， α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 为临边变暗系数。窄波段通道温度 T_B 到全波段通量密度亮温 T_F 的变换公式：

$$T_F = a + b T_B + c T_B^2 \quad (14)$$

利用本正演软件，通过正演模拟计算可确定临边变暗系数和转换公式(14)中的系数 a 、 b 、 c 。

参 考 文 献

- 1 Elsasser W M, Culbertson M F. Atmospheric Radiation Tables. Meteorological Monographs, AMS. 1960. 43.
- 2 AFCRL. ed. "Atmospheric transmittance/radiance: Computer code LOWTRAN-6". AFCRL-TR-85, 1985.

- 3 Anding David. Band-model methods for computing atmospheric slant-path molecular absorption. IRIA state-of-the-art report, 7142-21-7, Infrared and Optical Sensor Laboratory, Willow Run Laboratories, The Institute of Science and Technology, The University of Michigan. 1967.
- 4 McClatchey R A, Fenn R W, Selby J E, Volz F E, Garing J S. Optical properties of the atmosphere, A D 753075, AFCRL-72-0495, 1972.
- 5 Kneizys F Y, Shettle E P, Gallerg W O. "Atmospheric transmittance/radiance, The LOWTRAN 5 Code". SPIE Vol. 277, Atmospheric Transmission. 1981. 119.
- 6 Selby J E A and McClatchey R A. Atmospheric transmittance from 0.25 to 28.5 μm : Computer code LOWTRAN-2. AFCRL-TR-73-0745. 1972.
- 7 上海技术物理研究所编. 可见光和红外辐射在大气中的透过率. 中国科学院上海技术物理研究所出版. 1972.
- 8 吴晓, 邱康睦, 阴立新. NOAA 极轨气象卫星的地气射出长波辐射产品. 卫星气象技术报告, 9323 期, 1993.

CALCULATION OF EARTH ATMOSPHERIC TRANSMISSIVITY AND RADIANCE

Wu Xiao

(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

A simplified calculation method of the earth atmospheric spectrum transmissivity and the IR radiance arrived at the top of atmosphere is introduced. Spectral range is from 4 μm to ∞ μm . The Elsasser band model and empirical parameters are used to calculate the absorption of H_2O , CO_2 and O_3 . The continuous absorption of H_2O is calculated by LOWTRAN-6 empirical equation. The calculated results of transmissivity are coincided with those of LOWTRAN. Based on the simplified transmissivity model, a radiative transfer regression model is set up, and relevant software is developed. It is applied in data processing of satellite outgoing longwave radiation, and good results are obtained.

Key words: Atmospheric transmissivity Radiance Outgoing longwave radiation