

CO₂大气透过率的统计算法

刘全华 董超华 黎光清

(国家气象局卫星气象中心)

提 要

红外 CO₂ 吸收带大气透过率算法的改进,是将物理反演法用于业务反演系统所必须突破的最大障碍之一。本文基于 McMillin 和 Fleming 的工作^[5,6]而进行的回归变量调整和谐通道宽度的非确定性修正两个算法试验,结果表明:利用前两个算法计算的透过率精度明显地优于后者。

一、引 言

根据气象卫星的辐射率测值可以通过遥感方程反演大气温度、湿度、以及云参数等气象要素,应用物理反演方法求解十分麻烦的遥感方程时,就必须建立快速的、高精度的大气透过率模式和算法。当前虽然逐线积分方法(LBL)计算精度相当高,但计算量太大耗费昂贵,即便是当前一般的巨型机也难于完成全球 TOVS 扫描点透过率的实时计算,因此,在卫星资料业务反演系统中还无法实用。为了探索快而精又适于业务物理反演法的大气透过率算法,近年来相继有大量文章发表,例如: Clough^[1], Pierluissi^[2,3]以及 Chedin 和 Scott^[4]等,但 NESDIS 日常业务反演系统使用的仍是 McMillin 和 Fleming^[5-7]所建立的透过率模式和回归算法,该方法具有快而精的基本特点。从本质上讲 McMillin 和 Fleming 算法(以下简称 MF 算法)就是根据第 $i-1$ 气压层的透过率,在给定的一组大气条件 ($T(p)$, $\hat{T}(p)$) 下通过求解下列递归程序

$$\tau_i = \tau_{i-1} f_i(T(p), \hat{T}(p)), \quad i = 1, 2, \dots, N$$

算出第 i 层的透过率。式中 $\tau_0 = 1$ 表示大气层顶, $f_i(T(p), \hat{T}(p))$ 表示按下标 i 计算的温度廓线依赖项的线性组合,其中 $T(p)$ 是给定的参与计算的一组非独立的温度廓线, $\hat{T}(p)$ 是作为检验用的不参与回归计算的独立的参考温度廓线。

本文对 MF 算法进行了统计分析,发现在选用的 16 条大气廓线^[8]统计样本情况下, ΔT^2 项作为回归变量参与计算,会引起回归算法的不稳定,导致计算透过率误差的某些增大。为了克服不稳定,我们作了回归变量调整算法(简称 MF1)试验;为了同时考虑不同谱通道宽度的光谱特性对透过率的影响,在 MF 算法的基础上我们还进行了谱通道宽度的非确定性修正算法(简称 MF2)试验。数值试验结果表明:我们建议的统计调整和谐通道宽度的非确定性修正算法,对各个探测通道透过率的计算精度都有比较明显的改善。

二、算法理论

对单色辐射和常量混合比的 CO₂ 吸收气体,在大气层顶 ($P \approx 0$) 和气压 P 之间关顶

1987年6月2日收到,1987年8月17日收到修改稿。

角为 θ 的大气透过率可写成

$$\tau(\nu, T, \theta, P) = \exp \left[- (q \sec \theta / g) \int_0^P k(\nu, T, P') dP' \right], \quad (1)$$

式中 q 是吸收气体的定常平均混合比, g 是重力加速度, 而 $k(\nu, T, P)$ 是在波数 ν , 气压 P 以及温度 $T(P)$ 的吸收系数, 在以下的方程中不标出天顶角 θ .

实际上期望得到连续地依赖于 P 的温度反演廓线是不可能的, 因而需要预先选定若干气压层. 为了计算透过率, 将大气层划分为 n 层, 可将方程 (1) 改写成

$$\tau(\nu, T, p + \delta p) = \exp \left[- q/g \int_p^{p+\delta p} k(\nu, T, p') dp' \right] \quad (2)$$

式中 δp 为气压增量. 根据 (2) 式取美国标准大气温度廓线作为参考大气 ($\hat{T}$) 所表征的透过率与选定的一组温度廓线 (T) 所计算的透过率作比较, 有

$$\frac{\tau(\nu, T, p + \delta p)}{\tau(\nu, T, p)} \times \frac{\tau(\nu, \hat{T}, p)}{\tau(\nu, \hat{T}, p + \delta p)} = \exp \left\{ - q/g \int_p^{p+\delta p} [k(\nu, T, P') - k(\nu, \hat{T}, P')] dp' \right\}. \quad (3)$$

再将上式右端被积函数中的吸收系数之差按 Taylor 级数展开并用中值定理导得

$$\frac{\tau(\nu, T, p + \delta p)}{\tau(\nu, T, p)} \times \frac{\tau(\nu, \hat{T}, p)}{\tau(\nu, \hat{T}, p + \delta p)} = \exp \left\{ - q/g \delta p \left[\sum_{m=1}^M \frac{d^m k}{dT^m} \frac{\Delta T^m}{m!} + O(\Delta T^{M+1}) \right] \right\}, \quad (4)$$

式中 $\Delta T = T - \hat{T}$, 在求和中的函数都是按闭合区间 $(p, p + \delta p)$ 中某气压层计算的, O 表示 Landau 量级标识符. 因为

$$\frac{d^m k}{dT^m} \propto \left(\frac{1}{T} \right)^{m + \frac{1}{2}},$$

现将指数函数展开成 Maclaurin 级数, 取其二次近似, 之后集合诸项, 有

$$\frac{\tau(\nu, T, p + \delta p)}{\tau(\nu, T, p)} \times \frac{\tau(\nu, \hat{T}, p)}{\tau(\nu, \hat{T}, p + \delta p)} = 1 + a \Delta T + b \Delta T^2 + O(\Delta T^3), \quad (5)$$

式中 a 和 b 是待定系数. 对上式引入分层概念之后, 定义

$$\begin{aligned} \tau_i &= \tau(\nu, T_i, P_i), \quad P_i = P_{i-1} + \delta P_i, \\ \Delta T_i &= T(P_i) - \hat{T}(P_i), \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned}$$

由此可将方程 (5) 改写成

$$\frac{\tau_i}{\tau_{i-1}} \times \frac{\hat{\tau}_{i-1}}{\hat{\tau}_i} = 1 + a_i \Delta T_i + b_i \Delta T_i^2, \quad (6)$$

$$\tau_0 = 1, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

令

$$\alpha_i = \frac{\hat{\tau}_{i-1}}{\hat{\tau}_i}, \quad \beta_i = \alpha_i a_i, \quad \gamma_i = \alpha_i b_i,$$

则

$$\tau_i = \tau_{i-1} (\alpha_i + \beta_i \Delta T_i + \gamma_i \Delta T_i^2), \quad (7)$$

因此在确定了系数 α_i 、 β_i 、 γ_i 之后, 按迭代方程 (7) 即可算出不同通道各层的透过率.

三、谱通道宽度的非确定性修正

在气象卫星上, 由于受到目前技术的限制, 探测器测得的辐射率是在一定的光谱带宽 $\Delta\nu$ 内的平均值. 在间接遥感中我们必须取一定带宽才能获得足够的辐射能量, 例如 TIROS-N 卫星的 HIRS/2 的第 19 通道的半功率带宽 $\Delta\nu$ 已达 100cm^{-1} , 因此, 为获得特定通道透过率, 就须利用探测器滤光片的光谱响应函数和计算透过率卷积, 即

$$\bar{\tau}_i(\Delta\nu) = \int_{\Delta\nu} \tau_i(\nu) \Phi_i(\nu) d\nu, \quad (8)$$

式中 $\Phi(\nu)$ 是归一化的仪器通道光谱响应函数, 将 (7) 代入 (8) 应用第二均值定理, 有

$$\bar{\tau}_i(\Delta\nu) = (\alpha_i(\nu_1) + \beta_i(\nu_2) \Delta T_i + \gamma_i(\nu_3) \Delta T_i^2) \bar{\tau}_{i-1} \quad (9)$$

这里 $|\nu - \nu_0|$, $|\nu_2 - \nu_0|$, $|\nu_3 - \nu_0| < \Delta\nu$, ν_0 为中心频率, 但是 ν_1 , ν_2 , ν_3 是未知的, 仍需用逐线法计算, 为简化运算, 假定 α_i , β_i , γ_i 对 ν_1 , ν_2 , ν_3 无关, 由于这个假定导致多光谱信息的损失, 可能通过增加两个变量而得到一些调整, 这些新变量分别为

$$\Delta T_i^* = \frac{1}{p_i} \int_0^{p_i} \Delta T(p) dp \quad (10)$$

$$\Delta T_i^{**} = \frac{2}{p_i^2} \int_0^{p_i} p \Delta T(p) dp \quad (11)$$

以上二式分别表示和气压有关的平均温度和权重平均温度. 现在如果将 ΔT_i^* 和 ΔT_i^{**} 的线性项加入方程 (9), 不考虑原式诸项对 ν_1 , ν_2 , ν_3 的依赖, 便得到下列方程

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_i(\Delta\nu) &= (\alpha_i + \beta_i \Delta T_i + \gamma_i \Delta T_i^2 + \zeta_i \Delta T_i^* + \eta_i \Delta T_i^{**}) \bar{\tau}_{i-1}(\Delta\nu) \\ \bar{\tau}_0 &= 1 \end{aligned} \quad (12)$$

式中 ΔT_i^* 和 ΔT_i^{**} 的组合提供有关 ΔT 随气压和在第 i 层以上气压的加权平均值而变化的信息. 方程 (12) 是目前 NOAA 系列卫星反演系统中所用的大气透过率算法模式^[8]. 我们认为如果考虑到由于每个探测通道的光谱辐射特性不同, 在方程 (12) 中增加一项谱通道宽度的非确定性修正项, 便得到下列方程

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_i(\Delta\nu) &= (\alpha_i + \beta_i \Delta T_i + \gamma_i \Delta T_i^2 + \zeta_i \Delta T_i^* + \eta_i \Delta T_i^{**}) \bar{\tau}_{i-1}(\Delta\nu) + C(K) \Delta T_i \\ \bar{\tau}_0 &= 1 \end{aligned} \quad (13)$$

为简便起见, 这里假定 $C(K)$ 仅和探测通道相关, 而和气压及温度无关. 有关 $C(K)$ 的效应将在另一节讨论.

四、回归系数的确定

为了能够在业务反演系统中不用计算量太大的逐线算法而实现快而精的透过率计算,

只需根据(8)式计算的 HIRS/2 谱通道的逐线透过率($\bar{\tau}_i(\Delta\nu)$),之后按选定的一组温度廓线和独立的参考廓线利用(12)或(13)式通过最小二乘拟合就可确定其中的回归系数。

在构造递归算法程序中,为了避免用最小二乘法求解方程(12)或(13)时在头二层中出现解的不稳定,因此,在实际计算中当 $i=1,2$ 时,令

$$\zeta_1 = \zeta_2 = \eta_1 = \eta_2 = 0$$

并按下列方程参与回归求解:

$$\tau_1 = \alpha_1 + \beta_1 \Delta T_1 + \gamma_1 \Delta T_1^2, i=1 \quad (12.A)$$

$$\tau_2 = [\alpha_2 + \beta_2 \Delta T_2 + \gamma_2 \Delta T_2^2] \tau_1, i=2 \quad (12.B)$$

在计算中对整层大气从 $P=0$ 到 $P=P_0$ 按分层下标 $i=1, N$ 求得回归解,其中除第1和第2层只能确定二个系数(β, γ)外,其它各层均需算定四个系数($\beta, \gamma, \zeta, \eta$)。在回归系数确定后,只须再作少量运算和递归迭代即可得到不同通道的透过率,有关 MF 算法的精度及其改进拟在第六节中讨论。

五、数值试验样本的选择

本节中我们仅介绍将此方法用到 HIRS/2 的 $15\mu\text{m}$ CO₂ 吸收带七个通道透过率计算所涉及的大气温度廓线样本。如下表所示,在透过率计算中将大气分为 40 层,此数据集包括由 Weinreb 等^[8]精心选定的 19 条大气温度廓线,并用 Drayson 逐线算法^[9]求出所有廓线的透过率。

层次	气压(hPa)	层次	气压(hPa)	层次	气压(hPa)	层次	气压(hPa)
1	0.1	11	10.0	21	115	31	500
2	0.2	12	15.0	22	135	32	570
3	0.5	13	20.0	23	150	33	620
4	1.0	14	25.0	24	200	34	670
5	1.5	15	30.0	25	250	35	700
6	2.0	16	50.0	26	300	36	780
7	3.0	17	60.0	27	350	37	850
8	4.0	18	70.0	28	400	38	920
9	5.0	19	85.0	29	430	39	950
10	7.0	20	100.0	30	475	40	1000

其中第1条廓线是 U.S. 标准大气(1962),第2至7条是按 U.S. 标准廓线各层平移 $\pm 10\text{k}$ 、 $\pm 20\text{k}$ 、 $\pm 30\text{k}$ 所构造的 6 条温度廓线,第8至19条是非标准大气温度廓线,实际上只有 16 条廓线用到方程(12)或(13)计算回归系数,而最后剩下的 3 条廓线是用作检验回归系数的可信度和算法精度的独立样本。

六、数值试验

如上所述本文的主要目的,在于通过对 MF 算法的统计分析,验证我们所建议的回归

变量调整算法(MF1)和通道宽度的非确定性修正算法(MF2)是否能够改进MF算法,获得更高精度的大气透过率。为此,我们根据前节中所选定的统计样本,将大气划分成40层,利用Drayson逐线数值积分方法^[9]和MF, MF1以及MF2算法,计算了 $15\mu\text{m CO}_2$ 七个通道的透过率。以下分三方面对数值试验结果进行统计分析

1. 统计回归变量的相关性

回归分析方法是物理变量的相关关系的一个常用的数理统计方法。这些变量之间并不存在确定性的函数关系,但存在非确定性的依赖关系。因此,在多重线性回归分析中,我们须要对回归变量之间的相关性进行统计分析检验,以便了解变量之间的相关程度,找出相关性强的回归变量,筛掉相关性特别弱的回归变量,从而改善回归计算的稳定性,提高透过率计算的精度,定义

$$Y_i = \frac{\bar{\tau}_i}{\bar{\tau}_{i-1}} - \alpha_i,$$

$$\alpha_i = \frac{\hat{\tau}_i}{\bar{\tau}_{i-1}},$$

$$X_2 = \Delta T_i, X_3 = \Delta T^2,$$

$$X_4 = \Delta T_i^*, X_5 = \Delta T_i^{**},$$

则方程(12)可改写成

$$Y_i = \beta_i X_2 + \gamma_i X_3 + \zeta_i X_4 + \eta_i X_5 \quad (14)$$

根据上述的统计样本,应用回归分析方法^[10]检验了不同回归变量的标准偏差、回归系数以及偏回归平方和值(简称 P_i 试验值)。其中 $P_i (i=2, 3, 4, 5)$ 值是检验回归变量 X_i 对 Y_i 影响程度的特征值。如果 $P_i < 1$ 则认为回归变量 X_i 对 Y_i 没有多大影响; $P_i > 1$ 则认为 X_i 对 Y_i 有相当大的影响。

在表1中示出MF算法(方程(14)和(12a, b))四个回归变量取HIRS/2第3通道(691.6cm^{-1})的统计。分析表1中第2列各层的标准偏差 $(\alpha_x)_i$,第3列的相关系数 $(\rho_{xy})_i$,以及第4列的 P_i 试验值可知,和其它三项相比 Y_3 明显地具有最大的 σ_x 值,最小的相关系数 ρ_{xy} 和最小的 P_i 值。由此可见 ΔT^2 对 Y_i 的作用最小,相关性也最小。

根据上述原理,为了筛掉相关性特别弱的回归变量,改善最小二乘解的精度,我们称删去在方程(14)中的回归变量 Y_3 的算法为MF1。为了检验MF和MF1算法计算透过率的精度,在表2中示出根据Weinreb等^[8]文中第17条(A)和第19条(B)两条参考温度廓线按HIRS/2前七个谱通道用两种方法算出的透过率的最大误差($\varepsilon_i = \tau_i - \tau$, 下标 $i=1$ 表示MF算法; $i=2$ 表示MF1算法, τ 表示Drayson逐线算法的透过率)。从表2清楚看出用MF1方法所得的透过率的最大误差在各通道均小于MF算法相应值。

2. 谱通道宽度的非确定性修正

大气透过率强烈地依赖于不同通道的光谱特性,其中谱通道宽度的非确定性对透过率

表 1 MF 算法回归变量的统计相关性 (第 3 通道 691.5cm⁻¹ 示例)回归变量 2—— ΔT , 3—— ΔT^2 , 4—— ΔT^* , 5—— ΔT^{**}

回归变量	标准偏差 (σ_x)	回归系数 (ρ_{xy})	大气 压层	P 值	回归变量	标准偏差 (σ_x)	回归系数 (ρ_{xy})	大气 压层	P 值
1					15				
2	0.15235E+02	0.44615E-01	0.51120E-01		2	0.16419E+02	-0.99754E+00	0.15110E+01	
3	0.30100E+03	-0.49358E+00	-0.19534E+01		3	0.31067E+03	0.27938E-01	-0.48215E+00	
3					4	0.17380E+02	-0.97313E+00	0.15997E+01	
2	0.14554E+02	-0.97652E+00	0.15642E+01		5	0.19274E+02	-0.98392E+00	0.15759E+01	
3	0.31099E+03	0.20572E-03	0.26404E+00		17				
4	0.14632E+02	-0.97748E+00	0.15580E+01		2	0.15393E+02	-0.99457E+00	0.13704E+01	
5	0.20979E+02	-0.97921E+00	0.15651E+01		3	0.28136E+03	-0.16495E+00	0.50380E+00	
5					4	0.15831E+02	-0.90973E+00	0.16487E+01	
2	0.17294E+02	-0.98599E+00	0.15496E+01		5	0.17978E+02	-0.95898E+00	0.15502E+01	
3	0.34330E+03	0.38800E+00	-0.59407E+00		19				
4	0.15478E+02	-0.92778E+00	0.16799E+01		2	0.15955E+02	-0.99464E+00	0.13413E+01	
5	0.20702E+02	-0.96563E+00	0.16176E+01		3	0.27257E+03	-0.11384E+00	0.60476E+00	
7					4	0.15490E+02	-0.90006E+00	0.16598E+01	
2	0.19403E+02	-0.99696E+00	0.16934E+01		5	0.17389E+02	-0.95846E+00	0.15350E+01	
3	0.42607E+03	0.51220E+00	-0.10347E+01		21				
4	0.16965E+02	-0.96689E+00	0.16938E+01		2	0.15334E+02	-0.99162E+00	0.14707E+01	
5	0.22012E+02	-0.98852E+00	0.16982E+01		3	0.28762E+03	-0.13438E+00	0.66298E+00	
9					4	0.15336E+02	-0.93610E+00	0.16456E+01	
2	0.19226E+02	-0.99836E+00	0.16964E+01		5	0.17038E+02	-0.97818E+00	0.15455E+01	
3	0.39913E+03	0.46807E+00	-0.10887E+01		23				
4	0.17808E+02	-0.98727E+00	0.16829E+01		2	0.14539E+02	-0.99740E+00	0.14915E+01	
5	0.21762E+02	-0.99619E+00	0.16929E+01		3	0.30832E+03	-0.71457E-01	0.75684E+00	
11					4	0.15122E+02	-0.97135E+00	0.15974E+01	
2	0.18948E+02	-0.99974E+00	0.16842E+01		5	0.16380E+02	-0.97625E+00	0.15824E+01	
3	0.38052E+03	0.42178E+00	-0.11312E+01		25				
4	0.18348E+02	-0.99702E+00	0.16707E+01		2	0.15498E+02	-0.98799E+00	0.13243E+01	
5	0.22107E+02	-0.99922E+00	0.16829E+01		3	0.29964E+03	0.10494E+00	0.44964E+00	
13					4	0.14763E+02	-0.90073E+00	0.16260E+01	
2	0.17158E+02	-0.99952E+00	0.15638E+01		5	0.16298E+02	-0.93693E+00	0.15518E+01	
3	0.32690E+03	0.19374E+00	-0.73456E+00		27				
4	0.17894E+02	-0.98874E+00	0.16152E+01		2	0.16516E+02	-0.98925E+00	0.13264E+01	
5	0.20768E+02	-0.99371E+00	0.16051E+01		3	0.29428E+03	0.10445E+00	0.19321E+00	
					4	0.14916E+02	-0.89595E+00	0.16416E+01	
					5	0.16661E+02	-0.93884E+00	0.15509E+01	

续表 1

回归变量	标准偏差 (σ_X)	回归系数 (ρ_{XY})	大气压层	P 值	回归变量	标准偏差 (σ_X)	回归系数 (ρ_{XY})	大气压层	P 值
29					35				
2	0.17570E+02	-0.93757E+00	0.13130E+01		2	0.18710E+02	-0.69136E+00	0.11474E+01	
3	0.29577E+03	0.15785E+00	0.52981E-01		3	0.32542E+03	0.43026E+00	-0.61705E-01	
4	0.15332E+02	-0.83979E+00	0.16449E+01		4	0.16295E+02	-0.52468E+00	0.17491E+01	
5	0.17366E+02	-0.89996E+00	0.14921E+01		5	0.18510E+02	-0.60322E+00	0.15043E+01	
31					37				
2	0.18921E+02	-0.91384E+00	0.11610E+01		2	0.19560E+02	-0.89012E-00	0.13582E+01	
3	0.31204E+03	0.46916E+00	0.13842E+00		3	0.38015E+03	0.34299E+00	-0.10364E+01	
4	0.15593E+02	-0.71275E+00	0.17755E+01		4	0.16690E+02	-0.77624E+00	0.17100E+01	
5	0.17666E+02	-0.78296E+00	0.16142E+01		5	0.18898E+02	-0.80888E+00	0.16562E+01	
33					39				
2	0.18915E+02	-0.72741E+00	0.11385E+01		2	0.21949E+02	-0.92509E+00	0.14568E+01	
3	0.31754E+03	0.58323E+00	0.36219E+00		3	0.55154E+03	0.59810E+00	-0.11823E+01	
4	0.16049E+02	-0.51617E+00	0.18659E+01		4	0.17082E+02	-0.76624E+00	0.18477E-01	
5	0.18319E+02	-0.60823E+00	0.15914E+01		5	0.19415E+02	-0.80420E+00	0.18209E+01	

表 2 用 MF 和 MF1 算法根据二组参考廓线计算透过率所得的最大误差 (ϵ_i)

大气廓线	Channel No.	1	2	3	4	5	6	7
	ϵ_1	667.7	679.8	691.5	703.4	717.2	732.6	749.5
A	ϵ_1	-.040	-.013	-.053	-.091	-.120	-.146	-.247
	ϵ_2	-.032	-.011	-.046	-.087	-.115	-.132	-.205
B	ϵ_1	-.061	-.014	-.057	-.092	-.068	0.075	-.093
	ϵ_2	-.045	-.010	-.056	-.088	0.064	0.073	0.078

的精度计算起重要作用, 因此, 在方程 (9) 中不考虑回归系数对谱通道宽度 $\Delta\nu$ 的依赖性势必会导致一定的误差, 而且对某些远翼弱吸收通道的透过率误差会更大, 特别是越接近对流层低层, 大气的核函数的非确定性越大, 因此, 还应根据各通道的不同光谱特性作适当的补充修正. 由于这类误差直接和 ΔT 有关, 因而对方程 (13) 取补充的修正量 $C(K) \cdot \Delta T$, 其中对 679, 691, 704, 716, 732, 748 和 898cm^{-1} 探测通道将 $C(K)$ 分别取成: 0.00016, 0.00002, 0.00038, 0.00043, 0.0004, 0.0005 和 0.0005. 它们是不参加回归计算的订正值, 基本上不增加计算量. 表 3 是根据上节中所选用的三条检验用的大气温度廓线并通过方程 (12) 和 (13) 算得的各通道透过率的最大误差 ($\epsilon_i = \tau_i - \tau$, 这里下标 $i=1$ 表示 MF 算法, $i=3$ 表示 MF2 算法). 比较分析看出, 进行谱通道宽度的非确定性修正后, 透过率的最大误差值有明显减小.

表 3 用 MF 和 MF2 算法根据二组参考廓线计算透过率所得最大误差 (ϵ_i)

大气廓线	Channel No.	1	2	3	4	5	6	7
	ϵ_1	667.7	679.8	691.5	703.4	717.2	732.6	749.5
A	ϵ_1	-.040	-.013	-.053	-.091	-.120	-.146	-.247
	ϵ_2	-.016	-.008	0.028	-.060	-.075	-.075	-.094
B	ϵ_1	-.061	-.014	-.057	-.092	-.068	0.075	-.093
	ϵ_3	-.025	0.009	0.040	0.055	0.065	0.074	0.081

3. 透过率精度的综合分析

为了全面分析 MF, MF1 和 MF2 算法计算 15 μm CO₂ 七通道透过率的可信度, 根据在第五节中所选定的样本, 应用三个算法进行计算, 其结果包括三法计算的透过率的最大误差 ($\varepsilon_i = \tau_i - \tau$, $i = 1, 2, 3$) 和在 15 个标准气压层的偏差 ($d_i = \tau_i(p_j) - \tau(p_j)$, $i = 1, 2, 3$; $j = 1, 2, \dots, 15$), 计算结果在表 4 中示出, 从表 4 可概括出如下三点:

(1) 在计算的 40 层透过率中, 如果以 Drayson 逐线积分算法为准 (当然由于光谱参数的某些非确定性, 因此, 逐线算法也仅具有相对最高的透过率精度), 则在七个通道中 MF 算法得到最大误差 (ε_i) 明显地大于 MF1 和 MF2 的相应值, 其中以 MF2 算出的透过率的最大误差 (ε_2) 最小。

(2) 在 10hPa 层上 MF 算法计算的透过率的精度比其它二法的精度高, MF2 在此层上的偏差最大, 但在其它各层三法所得的结果相反, 一般 MF1 的透过率偏差小于 MF, 而 MF2 算法所得透过率的精度优于其它二法的结果。

(3) 特别是在 700hPa 以下大气层, MF2 算法的透过率偏差明显小于其它二法, 这就有可能利用 MF2 算法得到第五、六、七通道的较高精度的透过率。

七、几点 结 论

根据数值试验的对比分析, 可以得出下列三点结论:

1. 在 MF 算法中, 可以删去回归变量 X_3 , 构造比较合理的 MF1 算法, 得到比 MF 法更高精度的透过率。

2. 在 MF 算法中考虑谱通道宽度的非确定性修正, 构造 MF2 算法, 除高层 (10hPa) 外, 可得到比 MF 更高精度的透过率, 特别是提高低层大气透过率的精度。

3. 使用 MF1 或 MF2 算法都可以得到比 MF 算法更小的透过率最大误差, 根据上述分析可以认为使用 MF1 或 MF2 算法均可改进 MF 算法, 提高透过率计算精度。

表4 透过率精度的综合分析

通道序号	τ 和 d_i	大气压层 (hPa)									各层的最 大误差 (ε_i)
		10.0	50.0	100.0	200.0	300.0	500.0	700.0	850.0	1000.0	
1	τ (LBL)	0.9755	0.3209	0.0990	0.0074	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
	d_1	0.0011	-.0215	-.0051	-.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.040438
	d_2	0.0015	-.0169	-.0036	-.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.032231
	d_3	-.0159	-.0023	0.0004	0.0007	0.0014	0.0020	0.0021	0.0026	0.0043	-0.015910
	τ (LBL)	0.9733	0.3120	0.0967	0.0070	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
	d_1	0.0005	-.0169	-.0030	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.061165
	d_2	0.0037	-.0063	0.0011	0.0010	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.044560
	d_3	-.0193	-.0085	0.0082	0.0033	-.0033	-.0011	-.0004	0.0021	0.0052	-0.024668
	τ (LBL)	0.9954	0.6254	0.3034	0.0494	0.0030	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	
	d_1	0.0002	-.0124	-.0056	-.0004	-.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.012449
2	d_2	0.0003	-.0107	-.0047	-.0003	-.0003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.010685
	d_3	-.0045	-.0082	-.0023	-.0003	-.0003	0.0004	0.0003	0.0003	0.0005	-0.008165

续表 4

通道序号	τ 和 d_i	大气压层 (hPa)									各层的最 大误差 (ϵ_i)
		10.0	50.0	100.0	200.0	300.0	500.0	700.0	850.0	1000.0	
2	τ (LBL)	0.9950	0.6187	0.2999	0.0481	0.0029	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	
	d_1	0.0000	- .0010	0.0007	0.0034	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.014096
	d_2	0.0007	0.0046	0.0042	0.0043	0.0007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.010036
	d_3	- .0063	0.0047	0.0071	0.0048	0.0002	- .0002	0.0000	0.0003	0.0007	-0.008730
3	τ (LBL)	0.9971	0.7832	0.5439	0.2503	0.1018	0.0273	0.0110	0.0023	0.0009	
	d_1	0.0000	- .0532	- .0444	- .0239	- .0195	- .0131	- .0066	- .0015	- .0007	-0.053230
	d_2	0.0003	- .0457	- .0392	- .0215	- .0190	- .0127	- .0064	- .0015	- .0007	-0.045749
	d_3	0.0268	0.0087	- .0026	- .0039	- .0086	0.0046	0.0116	0.0145	0.0256	0.028420
	τ (LBL)	0.9967	0.7589	0.5474	0.2652	0.0915	0.0186	0.0068	0.0014	0.0006	
	d_1	0.0000	0.0178	- .0277	- .0506	0.0040	0.0087	0.0044	0.0010	0.0002	-0.056869
	d_2	0.0006	0.0331	- .0209	- .0498	0.0021	0.0078	0.0039	0.0009	0.0002	-0.055760
	d_3	0.0285	0.0390	- .0126	- .0299	0.0021	- .0023	- .0046	0.0031	0.0262	0.039001
4	τ (LBL)	0.9984	0.9151	0.8009	0.6089	0.4380	0.2454	0.1520	0.0501	0.0212	
	d_1	0.0000	- .0530	- .0553	- .0476	- .0632	- .0904	- .0758	- .0346	- .0168	-0.090450
	d_2	0.0000	- .0455	- .0485	- .0424	- .0606	- .0871	- .0736	- .0332	- .0160	-0.087127
	d_3	0.0353	0.0236	0.0097	0.0031	- .0255	- .0528	- .0191	- .0040	0.0193	-0.059813
	τ (LBL)	0.9981	0.8909	0.8046	0.6343	0.4054	0.1870	0.1058	0.0303	0.0138	
	d_1	0.0000	0.0175	- .0333	- .0913	0.0083	0.0550	0.0469	0.0215	0.0041	-0.092051
	d_2	0.0005	0.0329	- .0235	- .0874	0.0053	0.0512	0.0442	0.0200	0.0045	-0.088113
	d_3	0.0376	0.0432	- .0106	- .0495	0.0205	0.0415	0.0167	0.0126	0.0296	0.055003
5	τ (LBL)	0.9985	0.9340	0.8591	0.7442	0.6354	0.4799	0.3774	0.2110	0.1310	
	d_1	0.0000	- .0453	- .0472	- .0442	- .0607	- .1092	- .1197	- .1026	- .0811	-0.119692
	d_2	0.0002	- .0385	- .0408	- .0386	- .0568	- .1039	- .1149	- .0970	- .0750	-0.114901
	d_3	0.0322	0.0273	0.0180	0.0135	- .0093	- .0708	- .0668	- .0535	- .0252	-0.074500
	τ (LBL)	0.9981	0.9136	0.8602	0.7613	0.6083	0.4143	0.3103	0.1594	0.1011	
	d_1	0.0000	0.0098	- .0262	- .0684	0.0012	0.0563	0.0638	0.0536	0.0109	-0.068453
	d_2	0.0005	0.0242	- .0154	- .0615	0.0026	0.0554	0.0627	0.0519	0.0151	0.064421
	d_3	0.0339	0.0340	0.0042	- .0201	0.0261	0.0638	0.0520	0.0347	0.0252	0.064636
6	τ (LBL)	0.9994	0.9703	0.9310	0.8606	0.7851	0.6641	0.5738	0.3966	0.2870	
	d_1	0.0000	- .0233	- .0266	- .0271	- .0418	- .0920	- .1175	- .1413	- .1447	-0.146204
	d_2	0.0000	- .0198	- .0232	- .0238	- .0393	- .0874	- .1124	- .1321	- .1306	-0.132402
	d_3	0.0512	0.0657	0.0563	0.0517	0.0340	- .0322	- .0660	- .0731	- .0644	-0.074537
	τ (LBL)	0.9993	0.9599	0.9311	0.8707	0.7667	0.6103	0.5106	0.3304	0.2394	
	d_1	0.0000	0.0039	- .0171	- .0462	- .0008	0.0474	0.0622	0.0710	0.0120	0.074962
	d_2	0.0002	0.0113	- .0114	- .0424	- .0004	0.0462	0.0611	0.0691	0.0215	-0.073366
	d_3	0.0532	0.0247	0.0244	0.0147	0.0364	0.0689	0.0717	0.0535	0.0264	0.073720
7	τ (LBL)	0.9998	0.9871	0.9689	0.9349	0.8995	0.8374	0.7846	0.6661	0.5823	
	d_1	0.0000	- .0165	- .0192	- .0204	- .0321	- .0771	- .1068	- .1563	- .1938	-0.246562
	d_2	0.0000	- .0141	- .0168	- .0180	- .0301	- .0730	- .1018	- .1455	- .1736	-0.205196
	d_3	0.0537	0.0727	0.0663	0.0640	0.0538	0.0020	- .0418	- .0628	- .0886	-0.094412
	τ (LBL)	0.9997	0.9795	0.9678	0.9415	0.8851	0.7922	0.7277	0.5954	0.5235	
	d_1	0.0000	0.0032	- .0112	- .0344	- .0025	0.0375	0.0534	0.0731	0.0171	-0.093382
	d_2	0.0000	0.0085	- .0067	- .0308	- .0010	0.0577	0.0534	0.0721	0.0283	0.073332
	d_3	0.0559	0.0224	0.0330	0.0298	0.0416	0.0694	0.0808	0.0679	0.0330	-0.080767

参 考 文 献

- [1] Clough, S. A., Kneizy, F. X., Rothman, L. S. and Gallery, W. O., 1981, Atmospheric spectral transmittance and radiance: FASCOD1B, proceedings of SPIE, 277, 152-166.
- [2] Pierluzzi, J. H. and K. Tomiyama, 1980, Numerical methods for the generation of empirical and analytical transmittance functions with applications to atmospheric trace gases, *Appl. Opt.*, 19, 2298-2309.
- [3] Pierluzzi, J. H. and C. E. Maragoudakis, 1986, Band model for molecular transmittance of carbon monoxide, *Appl. Opt.*, 25, 3974-3977.
- [4] Scott, N. A. and A. Chedin, 1981, A fast line-by-line method for atmospheric absorption computations: The automatized atmospheric absorption atlas, *J. Appl. Meteor.*, 20, 802-812.
- [5] McMillin, L. M. and H. E. Fleming, 1976, Atmospheric of an absorbing gas: A computationally fast and accurate transmittance model for absorbing gases with constant mixing ratios in inhomogeneous atmospheres, *Appl. Opt.*, 15, 358-363.
- [6] Fleming, H. E. and L. M. McMillin, 1977, Atmospheric transmittance of an absorbing gas. 2: A computationally fast and accurate transmittance model for slant paths at different zenith angles, *Appl. Opt.*, 16, 1366-1370.
- [7] McMillin, L. M., H. E. Fleming and M. L. Hill, 1979, Atmospheric transmittance of an absorbing gas. 3: A computationally fast and accurate transmittance model for absorbing gases with variable mixing ratios, *Appl. Opt.*, 18, 1600-1606.
- [8] Weinreb, M. P., H. E. Fleming, L. M. McMillin and A. C. Neuen Dorffer, 1981, Transmittance for the TIROS Operational Vertical Sounder, *NOAA Technical Report NESS, 85*, Washington, D. C., 60pp.
- [9] Drayson, S. R., 1966, Atmospheric transmission in the CO₂ bands between 12μ and 18μ, *Appl. Opt.*, 5, 385-391.
- [10] 中国科学院数学研究所数理统计组编, 1970, 回归分析方法, 科学出版社, 147.