

红外窗区大气透过率的测量

张广顺 张玉香 吴承权
王光华 张立军 高二薇

(国家卫星气象中心,北京 100081)

提 要

文章主要介绍了红外窗区太阳光谱测量的实验装置,观测方法和数据处理方法,处理了 $2390-3470\text{cm}^{-1}$ 和 $750-1300\text{cm}^{-1}$ 区域内的太阳光谱资料,得到了它们的大气透过率数据,并对处理结果进行了初步分析。我们认为这些大气透过率对气象卫星遥感仪器红外窗区通道选择和卫星气象资料反演等都是有用的。

关键词:太阳光谱;大气透过率;定天镜。

1 引 言

大气的光学参数,尤其是大气透过率,对气象卫星光学遥感仪器的通道选择和气象卫星遥感的资料反演工作都是至关重要的参数。而红外窗区通道在当前气象卫星成像遥感工作中更为重要。利用它们可得到表面温度、云图、监测火情和水情等等。

获得大气透过率的方法,一般来说有三种:一是根据实验定出带强、半宽甚至谱线强度等参数,用量子力学理论推求大气透过率;二是室内模拟实验。三是野外观测。

本文所涉及的大气透过率是野外观测的一种^[1]。它是以太阳光谱作为光源,大气自身作为光路,测出太阳光谱,经过处理得到大气透过率。由于大气窗区既有水汽连续吸收区的吸收系数,也有水汽及其它大气成分的弱谱线的吸收,同时又有气溶胶的削弱,所以利用理论计算常有很大偏差,利用一般实验室也不易测准,但利用太阳光谱这样强大的光源,大气这样长的光路,却是非常方便而有效的。此外,理论的和模式的及经验的透过率公式推广应用到非均匀介质中去,也需要在大气中做实际测量,验证和修正其中参数,使这些“等效”参数应用到大气中有最好的结果。因此,我们于1988年在北京国家气象局国家卫星气象中心大楼十层和楼顶建成了红外太阳光谱观测实验室。

2 实验装置和观测工作

该系统包括定天镜(主镜和副镜)、导光系统、光栅分光光度计及其计算机、打印机。此外还配有粒子计数器、温、湿、压自记录仪等^[2]。

实验装置的光路:定天镜由控制器控制用以跟踪太阳,它的主镜将太阳光反射到它的副镜后,穿过光阑,将太阳光导入实验室内,经第三镜反射到第四镜聚焦成像到第五镜,将红外分光反射到红外光光度计入口处经可调光阑导入光度计进行测试。测试结果可由分光计直接画出太阳光谱,也可在计算机屏幕上直接显示出太阳光谱图或由打印机打印出该图。也可以将太阳光谱数据和图存入硬、软磁盘上。

观测工作选择在天气晴朗、太阳高度角在10度以上的条件下进行。对在不同太阳高度角、不同波数下的太阳辐射能量进行观测。

3 数据处理

自1988年以来,利用这套设备,对太阳在不同高度角下进行观测,得到了波数分别为3500—1900 cm^{-1} 和1300—750 cm^{-1} 两个红外窗区的太阳光谱,如图1(a、b)。利用这些观测资料在PE-7500专用计算机上进行编程,计算出了波数分别为3470—2390 cm^{-1} 和1300—750 cm^{-1} 的整层大气透过率,如图2(a、b)。

3.1 大气透过率的确定

根据比尔-布格-朗伯定律^[3],单色透过率为

$$\tau_{m\nu} = F_{m\nu}/F_{\infty\nu} = \exp(-\epsilon_{\nu} \cdot m(\theta)) \quad (1)$$

其中 $F_{m\nu}$ 和 $F_{\infty\nu}$ 分别为地面观测波数为 ν 的太阳辐照度和大气顶波数为 ν 的太阳辐照度, ϵ_{ν} 为大气光学厚度, $m(\theta)$ 为大气质量数, θ 为天顶角。

在实验过程中,由于分光计本身的局限性,不可能直接测出单色太阳辐照度,只能测到有限光谱间隔为 $\Delta\nu$ 的太阳辐照度。则

$$\tau_{m\Delta\nu} = F_{m\Delta\nu}/F_{\infty\Delta\nu} = e^{-\epsilon_{\Delta\nu} \cdot m(\theta)} \quad (2)$$

式中 $\Delta\nu$ 为仪器分辨率。

对式(2)两边取对数

$$\ln F_{m\Delta\nu} = \ln F_{\infty\Delta\nu} - \epsilon_{\Delta\nu} \cdot m(\theta) \quad (3)$$

在实验期间,天空晴朗,大气稳定,即 $\epsilon_{\Delta\nu}$ 不随时间而变。且分光计的输出信号电压 $V_{m\Delta\nu}$ 与 $F_{m\Delta\nu}$ 成线性关系。则在不同大气质量数 $m(\theta)$ 下(即不同太阳高度角下)测出的太阳辐照度 $F_{m\Delta\nu}$,用最小二乘法,对由 $\ln F_{m\Delta\nu}$ 点所对应的 $m(\theta)$ 点进行曲线拟合,外推出 $F_{\infty\Delta\nu}$ 和求出 $\epsilon_{\Delta\nu}$ 。利用公式(2),可求出大气透过率。

对于大气质量数 $m(\theta)$ 的计算,按大气物理学和天文学原理^[4],则

$$m(\theta) = \{[(R/h)\cos\theta]^2 + 2(R/h) + 1\}^{1/2} - (R/h)\cos\theta \quad (4)$$

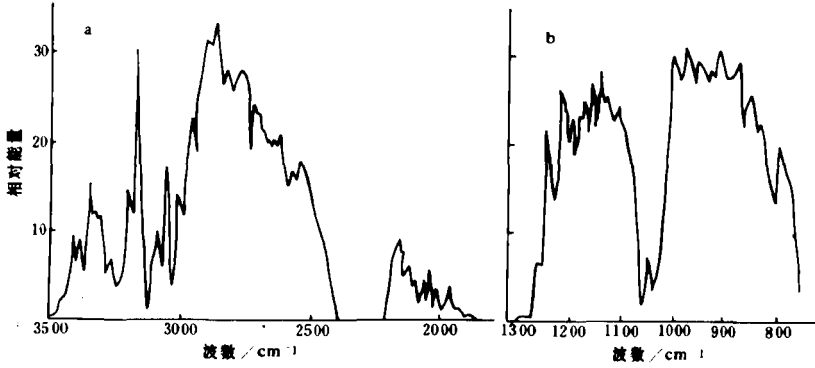


图1 太阳光谱图 (a)3500—1900cm⁻¹ (b)1300—750cm⁻¹(仪器分辨率为10cm⁻¹)

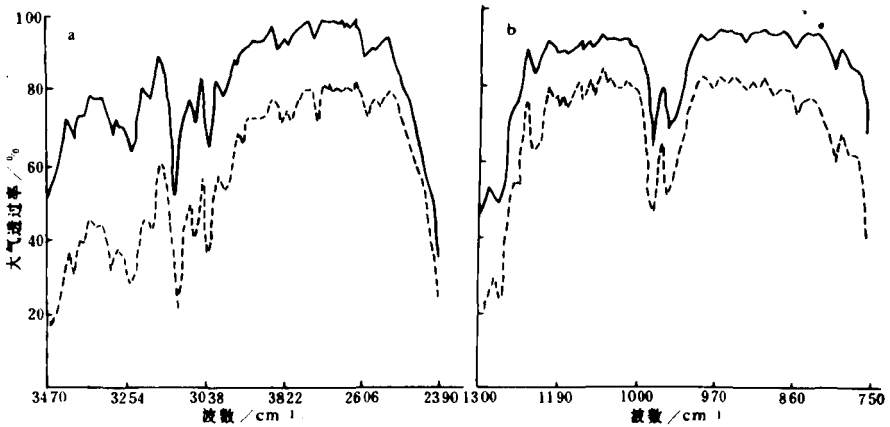


图2 大气透过率

(a)波数为3470—2390cm⁻¹(实线为1990年10月16日个例,虚线为1990年10月5日个例)

(b)波数为1300—750cm⁻¹(实线为1988年11月4日个例,虚线为1988年9月26日个例)

式中 R 为地球半径, h 为密度为 ρ_0 恒等于实际表面密度的均质大气的高度, 即 $h = p_0/g\rho_0$, 其中 p_0 和 ρ_0 为地表观测值, p_0 为气压值, g 为重力加速度。

$$\cos\theta = \sin\delta\sin\varphi + \cos\delta\cos\varphi\cos\theta_h \tag{5}$$

式中 φ 为测点的地理纬度, δ 为赤纬, θ_h 为太阳时角。其中

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912\cos\theta_0 + 0.070257\sin\theta_0 - 0.006758\cos 2\theta_0 \\ & + 0.000907\sin 2\theta_0 - 0.02697\cos 3\theta_0 + 0.001480\sin 3\theta_0 \end{aligned} \tag{6}$$

其中

$$\theta_0 = 2\pi d_n/365 \tag{7}$$

式中 d_n 的值由 1 月 1 日取 0, 到 12 月 31 日取 364 (闰年 365)。

3.2 程序的编制及调试

本实验的计算工作是由 PE-7500 计算机承担, 此机是专为 983G 红外分光计配制的。它的操作系统为 IDRIS。在此操作系统下, 在 CDS 环境下, 可对光谱进行控制、扫描、存储等工作。太阳光谱的观测和存储就是在此环境中实现的。而实验数据的处理则需要用 user 环境中, 根据前面提到的计算模式, 用 FORTRAN-77 编程完成。计算程序流程图如图 3。

在所观测的太阳光谱范围内, 对于强吸收带区域内的光谱, 地面接收不到能量, 所以在观测的红外短窗区 $3500-1900\text{cm}^{-1}$ 范围中, 选取 $3470-2390\text{cm}^{-1}$ 内所有波数上的能量值。对于红外长窗区, 选取 $1300-750\text{cm}^{-1}$ 范围内所有波数上的能量值。把以上数据分别代入程序进行计算。

关于光谱数据如何送入是数据处理工作中的一个重要环节。每次计算选取 20 条左右的谱线, 每条谱线长、短窗区分别取 551 和 1151 个数据送入内存。这就必须解决由程序自动实现读光谱数据的问题。经过软件开发, 用 FORTRAN-77 编程, 解决了自动打开光谱文件、检索数据、提取所需信息的问题。同时利用 FORTRAN 语言, 自编按波数及按太阳高度角分布的所选取光谱区域的计算大气透过率程序, 并不断进行修改、优化源程序, 建立了程序模块, 实现了数据处理的全自动化。自 1988 年以来, 计算出的透过率数据均做成数据文件。并绘制了所观测日的整层大气透过率图。

4 资料分析

经过对几年来太阳光谱观测资料的分析得出以下结论:

(1) 所有观测日的大气透过率, 短、长红外窗区的最大值分别在 2703cm^{-1} ($3.7\mu\text{m}$) 和 900cm^{-1} ($11.1\mu\text{m}$) 位置上。如图 2(a, b) 和表 1(a, b) 所示。这说明以上两个位置分别是红外短、长窗区最大透明处。

(2) 在同一波数, 如图 2(a, b) 和表 1—表 3, 由于每天的天气条件不同, 大气透过率随能见度减小而减小。能见度小表明气溶胶数密度大, 这说明由于气溶胶连续吸收的作用, 使之气溶胶越多, 能见度越小, 而大气透过率就越小。

(3) 在同一波数, 如图 2(a, b) 和表 1 及表 3, 大气透过率随绝对湿度增加而减少。这说明水汽连续吸收的作用, 水汽越多, 吸收越强, 大气透过率就越小。

(4) 用气象卫星扫描辐射计, 美国选择的通道, 其短、长红外窗区分别为 $3.55-3.93\mu\text{m}$ 和 $10.5-12.5\mu\text{m}$ 处。它们都处在透过率最大区域, 如图 2。因此该实验获

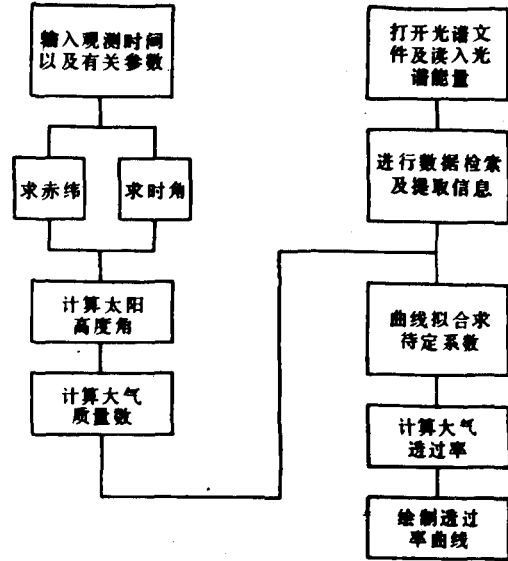


图3 计算透过率程序流程图

得的数据对气象卫星遥感仪器的红外窗区通道选择和卫星资料反演都是有价值的。

(5) 大气透过率的均方根误差绝大多数不超过1%，如表1。误差来源主要是定天镜系统跟踪误差，入射太阳光与分光计的入射光轴同轴性不好及天气等因素的变化所引起的。

表1 大气透过率

波数 (cm^{-1})	1990年10月5日		1990年10月16日		1988年11月4日			1988年9月26日	
	透过率	均方差	透过率	均方差	波数	透过率	均方差	透过率	均方差
3158	0.600	0.004	0.870	0.008	1300	0.436	0.0082	0.215	0.0033
2703	0.805	0.005	0.964	0.009	1100	0.905	0.0127	0.790	0.0068
2660	0.781	0.005	0.950	0.009	1054	0.629	0.0101	0.452	0.0051
2515	0.777	0.004	0.903	0.006	900	0.942	0.0166	0.815	0.0092
2390	0.235	0.001	0.316	0.008	750	0.664	0.0138	0.394	0.0063

表2 粒子数密度($\text{个}/\text{m}^3$)

时间	粒子直径(μm)					
	> 9	5 - 9	2 - 5	1 - 2	0.5 - 1	0.2 - 0.5
1988年9月26日	116500	448708	1733395	2301499	31494357	295184334
1988年11月4日	86583	212209	774209	770167	2762291	94338084

表3 大气透过率、绝对湿度和能见度

时间	波数 (cm^{-1})	透过率	绝对湿度 (g/m^3)	能见度 (km)
1988年9月26日	900	0.815	15.62	7
1988年11月4日	900	0.942	4.61	20
1990年10月5日	2703	0.805	13.03	2
1990年10月16日	2703	0.964	4.22	17

5 结束语

几年来实验证明,该系统的定天镜跟踪精度较好,自动化程度较高。观测到的太阳光谱资料和处理的整层大气透过率值同理论计算值和国外资料比较,规律是一致的^{[5][6][7]}。因此,用该套设备测量得到的透过率,对气象卫星遥感仪器红外窗区通道选择和卫星资料反演等卫星气象工作是有用的,并且是可信的。

参 考 文 献

- 1 曾庆存著. 大气红外遥测原理. 北京: 科学出版社, 1974, 88.
- 2 张广顺等. 红外长窗区大气透过率的测量. 气象, 1989, 15(11): 47-50.
- 3 K. Я. 康德拉捷夫著. 太阳辐射能. 李怀瑾等译. 北京: 科学出版社, 1962, 154.
- 4 G. W. 帕尔特里奇等著. 气象学和气候学中的辐射过程. 吕达仁等译. 北京: 科学出版社, 1981, 40.
- 5 中国科学院大气物理研究所汇编. 可见光和红外辐射在大气中的透过率(3-5微米及7-14微米红外窗区辐射的透过率). 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 9-12.

- 6 Богданов С. С., А. М. Броунштин, В. В. Демидов, И. А. Сакин. Аппаратура и Методика Измерений Спектральной прозрачности атмосферы В инфракрасной области спектра. Физика Атмосферы и Океана, 1963, 9(1):47-53.
- 7 David. M. Gates, Walter. J. Harrop. Infrared transmission of the atmosphere to solar radiation. *Applied Optics*, 1963, 2(9):887-898.

THE ATMOSPHERIC TRANSMISSIVITY MEASUREMENT IN INFRARED WINDOW REGION

Zhang Guangshun Zhang Yuxiang Wu Chengquan
Wang Guanghua Zhang Lijun Gao Erwei
(National Satellite Meteorology Center, Beijing 100081)

Abstract

This report mainly introduces the theory and facility for measuring solar infrared spectrum of window region. It also gives the method for calculating the atmospheric transmissivity within the range of 2390cm^{-1} to 3470cm^{-1} and 750cm^{-1} to 1300cm^{-1} .

The analysis results show that the data is helpful to the choice of infrared channels of remote sensing instruments of meteorological satellite, it is also useful to the retrieval of satellite data and so on.

Key words: Solar spectrum; Atmospheric transmissivity; Siderostat.