

# 气象卫星对臭氧总含量的探测

肖乾广 张凤英 董超华

(国家气象局卫星气象中心)

## 一、引言

臭氧是大气中一种微量气体,它对于人类的生存具有重大意义。臭氧能吸收来自太阳的紫外辐射,起到保护人类免受过量紫外辐射的作用。臭氧主要集中在地面上10—40公里<sup>[3]</sup>处。它是平流层内一种重要的大气成分,它强烈地吸收0.2—0.3微米太阳紫外辐射,0.46—0.74微米的可见光和近红外辐射,以及9—10微米的红外辐射。因此,臭氧是平流层内主要热源,根据臭氧的分布,可以了解平流层的大气环流。正因为臭氧含量的变化对大气环流有密切关系,所以,对臭氧总含量的探测越来越引起气象学家的重视。

以往对大气中臭氧含量的测量主要是地面观测、气球和火箭探测,这几种手段获得的资料都很有限,我国目前只有两个测站:北京(香河)、昆明。自从有了卫星以后,臭氧含量的探测发生了革命性的变化。探测范围从点扩大到面。卫星遥测臭氧总含量主要使用两个波段:红外的9.6微米臭氧吸收带;紫外的0.2—0.3微米吸收带。本文主要介绍用TIROS业务垂直探测器(TOVS)测量的辐射值来确定臭氧总含量的理论基础及其反演方法。最后给出了一些反演结果。

## 二、理论基础及其反演方法

TIROS-N/NOAA系列卫星上携带的TIROS业务垂直探测器(TOVS)由三个仪器组成<sup>[1]</sup>:高分辨率红外辐射探测器(HIRS/2),微波探测装置(MSU),及平流层探测装置(SSU)。HIRS/2由20个通道组成,MSU由4个通道组成,SSU由3个通道组成。这些

通道可用来探测几个光谱波段的大气辐射,用于反演大气温度的垂直廓线和水汽含量等<sup>[2]</sup>。由于大气中臭氧主要集中在平流层内(10—40 km)<sup>[3]</sup>,所以,在TOVS测量的辐射值中含有大气中臭氧含量的信息。这些信息在辐射值中以两种方式出现:第一种是与影响大气辐射的温度廓线有关的间接信息;第二种是位于臭氧吸收带的HIRS/2 9.6微米通道测量的直接信息<sup>[4]</sup>。如果给出这些信息之间的关系,利用TOVS测量的辐射值就可算出臭氧总含量 $\Omega$ 。

### 1. 理论基础

假定大气处于局地热力平衡状态下,且不考虑大气散射和云的影响,那么,TOVS测量的辐射值可用辐射传递方程描述:

$$I(\nu) = B[\nu, T(P_0)]\tau(\nu, P_0) - \int_0^{P_0} B[\nu, T(P)] \frac{d\tau(\nu, P)}{dP} dP \quad (1)$$

上式中 $I(\nu)$ 是通道中心波数为 $\nu$ 的TOVS测量的光谱辐射值; $B[\nu, T(P)]$ 是通道中心波数为 $\nu$ 、温度为 $T$ 的普朗克函数, $P$ 是气压; $\tau(\nu, P)$ 表示从大气压力层 $P$ 到大气顶的透过率。下标“0”表示地表面。方程(1)中,右边第一项为地表的辐射贡献;第二项为大气自身的辐射贡献,其中包括各种吸收气体,如二氧化碳、水汽、臭氧等的放射辐射贡献。图1给出了TOVS各通道的权重函数( $d\tau/dP$ ),是由“平均大气”计算得出的。图1中,用星号(\*)表示的权重函数被用于计算臭氧总含量 $\Omega$ 。表1给出了这些通道的光谱特征。表1中HIRS/2通道1、2、3、16及MSU 4主要用于探测平流层内大气的温度廓线。HIRS/2通道9主要用于探测臭氧总含量 $\Omega$ 。

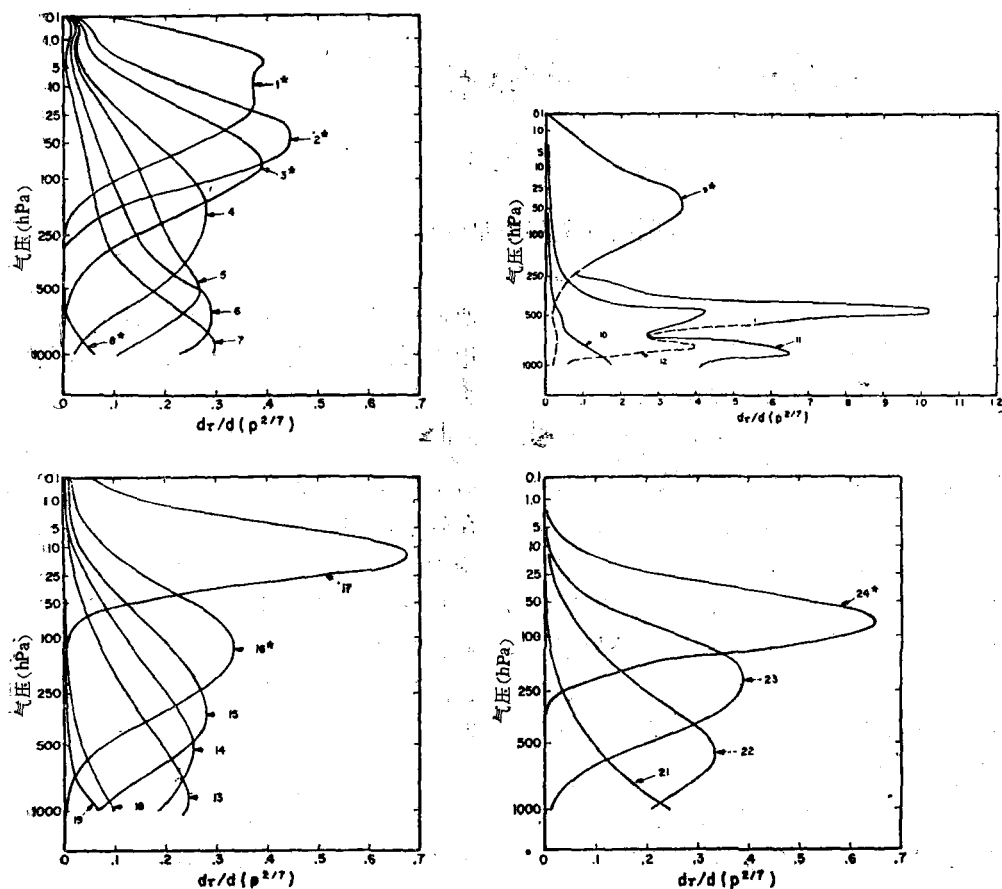


图 1 TOVS 各通道权重函数

表 1 用来推算臭氧总含量的TOVS  
部分光谱通道的特征

| 序号 | 通道号       | 中心波数<br>(cm <sup>-1</sup> ) | 波长(μm) | 主要吸<br>收成分      |
|----|-----------|-----------------------------|--------|-----------------|
| 1  | HIRS/2 1  | 668                         | 14.95  | CO <sub>2</sub> |
| 2  | HIRS/2 2  | 679                         | 14.71  | CO <sub>2</sub> |
| 3  | HIRS/2 3  | 691                         | 14.49  | CO <sub>2</sub> |
| 4  | HIRS/2 8  | 898                         | 11.11  | 窗区              |
| 5  | HIRS/2 9  | 1028                        | 9.71   | O <sub>3</sub>  |
| 6  | HIRS/2 16 | 2276                        | 4.40   | CO <sub>2</sub> |
| 7  | MSU 4     | 57.95GHz                    |        | O <sub>2</sub>  |

HIRS/2 通道 8 是一窗区通道。在此,我们将用它来去掉地面项的影响。

## 2. 反演方法

利用 TOVS 测值反演臭氧总含量  $\Omega$  的方法大致可分为两类:一是直接法,又称物理方法;二是间接法,即统计回归法。物理方法是利用 HIRS/2 9.6 微米通道光谱测值与臭

氧含量  $\Omega$  (或浓度) 之间的物理关系,对辐射传递方程(1)直接进行求解<sup>[5]</sup>。统计回归法则不考虑臭氧含量与光谱辐射值之间的物理关系,而是根据大量的统计样品,找相关,即利用回归方程进行求解。由于物理方法必须计算仪器通道的透过率( $\tau$ )及其权重函数( $dr/dP$ ),所以利用该方法计算 $\Omega$ ,花费机时较多。目前,美国国家环境卫星信息服务局(NESDIS)在全球业务 TOVS 资料处理系统中仍采用回归方法(包括温度、水汽、臭氧反演等)。在我们拟将建立的 HRPT TOVS 资料处理系统中也采用回归方法。下面我们介绍如何利用回归方法反演臭氧总含量  $\Omega$ 。

若给定一组 7 个 TOVS 通道(见表 1)的光谱辐射值(实际计算中采用等效黑体温度,简称亮温)与用其他方法观测的臭氧总含量  $\Omega$  (Dobson 站或火箭臭氧探空仪的测值)的

若干个样本(大约需要 400 个)进行回归统计;这种统计的匹配条件是:TOVS 探测与地面 Dobson 站(或火箭站)的臭氧观测时间间隔在 $\pm 6$ 小时之内, TOVS 的探测点与地面测站的距离在 $\pm 1$ 纬距以内(大约 110 公里)。用最小二乘法原理计算出回归系数, 已知回归系数和 7 个 TOVS 通道的实测亮温, 利用下面的回归方程便可反演出臭氧的总含量  $\Omega$ 。

$$\Omega = \bar{\Omega} + \sum_{i=1}^7 C_i (T_{Bi} - \bar{T}_{Bi}) \quad (2)$$

上式中,  $\bar{\Omega}$  是由相关匹配样品数据集计算出来的平均总臭氧含量(Dobson 单位), 同样,  $\bar{T}_{Bi}$  是相应通道的平均亮温 (K),  $C_i$  是相应通道的回归相应系数( $i$  的编号见表 1), 它是利用多重线性回归过程确定的。  $T_{Bi}$  是由卫星测量的经过一定处理的探测点的晴空辐射值(即亮温)。

### 3. 晴空辐射值的确定

在辐射传递方程(1)中, 我们假定大气是晴空的, 也就是说仪器扫描视场内无云存在。事实上, 仪器扫描视场内并非总是无云的。因此, 在利用方程(1)进行反演之前必须对卫星实测辐射值进行处理, 从而得到近似于晴空大气的辐射值。我们把确定晴空辐射值的过程称为“晴空辐射模式”<sup>[6]</sup>。利用该模式可以确定卫星扫描视场为: (1) 晴空, (2) 部分有云, 或(3)全部被云覆盖。在我们拟将建立的 TOVS 处理系统中, 选择了 70—80 公里的水平空间分辨率。这样就需要  $3 \times 3$  个 HIRS/2 单个视场<sup>[1]</sup>确定一个探测点。MSU 扫描视场的空间分辨率与 HIRS/2 不同, 于是, 我们利用双线性内插法将 MSU 扫描点的辐射测值插值到 HIRS/2 扫描点上。如果 9 个 HIRS/2 视场中多数视场为晴空, 我们则把该探测点视为晴空。在这种情况下, 探测点的辐射值由其诸晴空点辐射值加权平均来确定。如果 9 个 HIRS/2 视场中多数视场部分有云, 则利用估算晴空辐射值的  $N^*$  方

法<sup>[6]</sup>, 这种方法简述如下。

我们利用 TOVS 的 HIRS/2 的辐射测值来求得平均晴空辐射值, 作法是选取几个通道对相邻近的视场的辐射值用统计方法计算出某个区域的平均晴空辐射。这种方法要求仪器视场要小, 约在 30 km 以内, 这个条件 HIRS/2 是能够满足的。当考虑 HIRS/2 仪器对两个相邻近的视场进行观测时, 可建立如下关系式:

$$I_1(\nu_i) = N_1 I_{ca}(\nu_i) + (1 - N_1) I_c(\nu_i) \quad (3)$$

$$I_2(\nu_i) = N_2 I_{ca}(\nu_i) + (1 - N_2) I_c(\nu_i) \quad (4)$$

这里  $I_1(\nu_i)$ ,  $I_2(\nu_i)$  表示 HIRS/2 第  $i$  通道的第一、第二视场的辐射测值,  $N_1$  表示在第一视场内的云量,  $N_2$  表示第二视场内的云量,  $I_{ca}(\nu_i)$  是第  $i$  通道视场内云区的辐射测值,  $I_c(\nu_i)$  是第  $i$  通道视场内晴空区的辐射值。

对于两个相邻的 HIRS/2 视场来说, 假如云的类型、高度一样, 即  $I_{ca}(\nu_i)$ 、 $I_c(\nu_i)$  相同。在这两个视场内只是云量不同。这样, 晴空辐射  $I_c(\nu_i)$  可由两个相邻近的视场的辐射测值来表示。由(3)、(4)可以推导出

$$I_c(\nu_i) = \frac{I_1(\nu) - N^* I_2(\nu)}{1 - N^*} \quad (5)$$

其中  $N^* = N_1/N_2$ , 称作两个视场云量比。

确定  $N^*$  的方法是采用 MSU (微波探测器) 的第二通道的辐射值作为标准。其原理是假定无云大气时, MSU 第二通道的权重函数曲线把 HIRS/2 4—12 通道的权重函数曲线包含在内, 这时在无云大气的情况下, 微波辐射测值可由 HIRS/2 的红外辐射测值线性组合得到, 即

$$I(\text{MSU}(2)) = \sum_{i=1}^M a_i I_c(\nu_i) \quad (6)$$

其中  $M$  表示通道数,  $a_i$  为回归系数,  $I_c(\nu_i)$  为红外通道的晴空辐射值。把公式(6)代入公式(5)可以得到下列关系:

$$I(\text{MSU}(2)) = \sum_{i=1}^M a_i \frac{I_1(\nu_i) - N^* I_2(\nu_i)}{1 - N^*} \quad (7)$$

将(7)作简单变换可得到:

$$N^* = \frac{I(\text{MSU}(2)) - \sum_{i=1}^M a_i I_1(v_i)}{I(\text{MSU}(2)) - \sum_{i=1}^M a_i I_2(v_i)} \quad (8)$$

用这种方法计算出  $N^*$  的值, 必须事先计算出线性组合系数, 即回归系数  $a_i$ 。  $a_i$  可由两种方法得到: (1) 理论计算, (2) 根据实际资料计算。本文中的计算是采用后者, 即用晴空条件下 HIRS/2 的第四至第十二通道的辐射测值与 MSU(2) 的辐射测值建立回归关系, 求得系数  $a_i$ 。  $a_i$  随温度廓线反演用的回归系数一起更新, 通常每周更换一次。

将(8)代入(5)即可得到晴空辐射值。

由上述方法确定该探测点的辐射值。在晴空和部分有云情况下, 我们都可以利用方程(2)推算出臭氧总含量  $\Omega$ 。若 9 个 HIRS/2 视场内全部有云, 则不可能得到 HIRS/2 的晴空辐射值。在这种情况下, 只能利用受云影响较小的 MSU 的微波辐射值反演温度, 而不能反演臭氧总含量  $\Omega$ 。

#### 4. 回归系数的确定

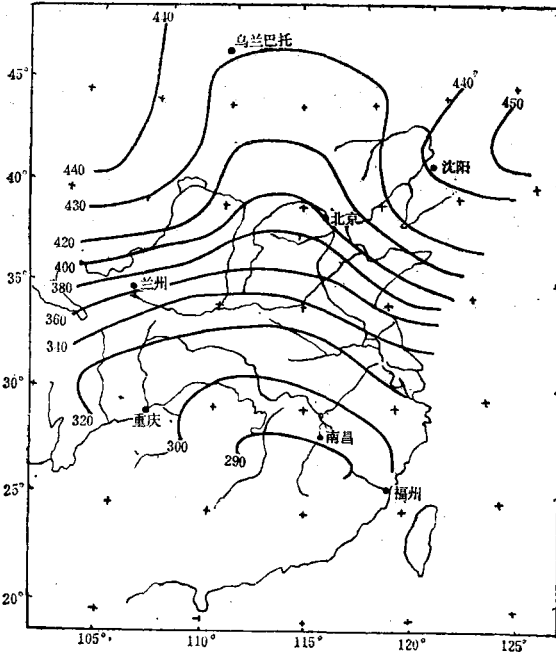


图 2

由于臭氧总含量明显地随纬度和季节而变化<sup>[3]</sup>, 由赤道至极地, 总含量递增; 由秋天至翌年春季, 总含量递增, 然后随时间递减, 至秋天达最小值。所以, 对于不同的季节和区域, 需要产生不同的回归系数。为确保反演精度, 必须对回归系数定期进行更新<sup>(7)</sup> (每月一次)。NESDIS 分别计算了四个季节 (春、夏、秋、冬) 和 5 个区域的回归系数。这五个区域是:  $90^\circ\text{N}-60^\circ\text{N}$ ,  $60^\circ\text{N}-30^\circ\text{N}$ ,  $30^\circ\text{N}-30^\circ\text{S}$ ,  $30^\circ\text{S}-60^\circ\text{S}$  和  $60^\circ\text{S}-30^\circ\text{S}$ 。在利用方程(2)反演臭氧含量  $\Omega$  时, 需要根据探测点的时间和地理位置确定反演系数  $C_i$ 。计算一组回归系数, 需要足够多的匹配样本 (约 400 个), 而我国目前只有两个臭氧观测站, 所以, 由于客观条件所限, 我们还不能利用我们国家的实测资料计算出适合于我国气候特征的回归系数来。我们这里只好采用由 NESDIS 提供的臭氧反演的回归系数。

### 三、结果与讨论

我们利用北京 HRPT (High Resolution Picture Transmission) 接收站接收的 TOVS

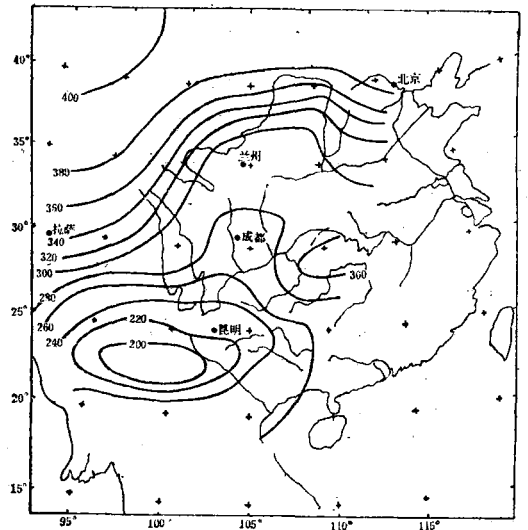


图 3

资料,按照前面介绍的方法计算出 1984 年 2 月 13 日 20 GMT 和 1984 年 2 月 18 日 21 GMT 臭氧总含量并分别绘制在图 2 和图 3

表 2 臭氧含量探测比较表

| 地点 | 时 间<br>(1984年)       | 臭氧总含量(单位: Dobson) |     |      |
|----|----------------------|-------------------|-----|------|
|    |                      | 回归法               | 物理法 | 常规探测 |
| 北京 | 2 月13日<br>(20:00GMT) | 412               | 404 | 406  |
|    | 2 月15日<br>(07:30GMT) | 393               | 375 | 379  |
| 昆明 | 2 月18日<br>(21:00GMT) | 237               | 278 | 262  |
|    | 2 月19日<br>(06:30GMT) | 232               | 268 | 260  |

中。图中的曲线是表示臭氧总含量分布的等值线 (单位: Dobson, 1000 Dobson=1 cm S.T.P.)。从图中等值线的分布可以看出: 大气中臭氧总含量随着纬度的降低而明显减少。把反演的臭氧总含量与时间和空间上相匹配的常规探测资料进行比较, 表 2 给出了比较结果。在我国只有北京(香河)和昆明两个常规臭氧观测站。表 2 中, 回归法即指本文二中介绍的方法, 第四列给出物理模式<sup>[5]</sup>

反演臭氧总含量的结果; 第五列则给出了常规探测值。从表 2 可以看出: 本文介绍的回归法反演结果稍劣于物理模式反演结果, 但其绝对平均误差仍小于 8%。我们给出的反演结果是某一特定时刻的, 而常规探测给的是日平均值。

## 参 考 文 献

- [1] NOAA Technical Memorandum NESS 107.
- [2] NOAA Technical Report NESS 83.
- [3] 曾庆存, 大气红外遥测原理, 科学出版社.
- [4] D. S. Crosby, W. G. Pianet, A. J. Miller, R. M. NAGATANI, Evaluation and Comparison of Total Ozone Fields Derived from TOVS and SBUV, Fourth Conference on Atmospheric Radiation 1981.
- [5] 马霞麟、张凤英, 由 TOVS 资料反演臭氧总含量的初步试验. (送《大气科学》)
- [6] L. M. McMillin and C. Dean, Evaluation of a New Operational Technique for Producing Clear Radiances, J. Applied Met. Vol. 12, No. 7, July 1982.
- [7] W. G. Pianet, D. S. Crosby, J.H.Lienesch and M.L.Hill, Determination of Total Ozone Amount from TIROS Radiance Measurements, J. of Climate and Applied Met. Vol. 23, Feb. 1984.