

一个新的遥感大气臭氧层垂直剖面模式*

魏鼎文

柳 燕

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

(华北电力大学数学系, 北京 102206)

摘 要 在长期对本课题的研究与反复实践的基础上, 本文提出一个新的由地面(逆转效应)遥感大气臭氧层垂直剖面模式。通过大量观测实例计算分析以及与气球直接探测的比较研究, 结果表明, 本模式的性能优于目前国际上通用的逆转遥感模式, 它更可靠, 更接近于直接探测。

关键词 大气臭氧层 垂直剖面 遥感模式

1 引言

臭氧层问题一直是近年来环境领域中的一个热门课题, 而在臭氧层问题中, 臭氧垂直分布的监测与分析研究, 又是其中特别重要的一部分。因为当今全球大气臭氧含量的减少, 以及南极臭氧空洞的成因, 在理论解释上, 都涉及到臭氧垂直剖面的长期演变过程, 特别是不同地域的上层臭氧长期演变趋势的分析与比较研究。要进行臭氧垂直分布的长期(30年以上)演变分析, 目前唯一可以应用的资料是逆转遥感资料, 它可以从本世纪50年代中期一直沿续到现在。毫无疑问, Gotz 和 Dobson^[1]对逆转效应发现和逆转方法运用于大气臭氧层的垂直剖面遥感, 在大气臭氧研究领域中是一个意义重大的进展, 即使在今天, 逆转方法仍然是获取臭氧垂直剖面的重要途径之一。在50年代后期与60年代初期, 魏鼎文^[2]详细地研究了逆转效应的物理过程, 并发表了几个重要的发现: 1) 首次提出了权重函数及其在逆转遥感方程中的应用, 并由此清楚地指出, 逆转曲线中所包含的独立信息量数目是有限的, 遥感通道不能选择过多; 2) 首先发现了大气遥感方程解的不唯一性和不稳定性问题; 3) 作为检验, 不仅在理论上而且在实践上, 证明了逆转方法解的不唯一性, 而该方法当时是由国际臭氧委员会推荐并曾在国际上广为流行的方法^[3]。

1964年, 有两个新的遥感臭氧垂直分布逆转模式发表。其一是所谓的标准逆转方法^[4], 在这种方法里, 臭氧层被划分为9层进行反演求解, 它的重要的特征之一就是应用了3个标准的臭氧垂直分布作为前置限制性的假设条件, 以避免解的不唯一性问题, 这种方法至今在世界上仍有广泛的应用。另一是魏鼎文、林启锦按照权重函数的物理特征, 发展了一个叫做逆转方法<C>的模式^[5], 在此模式中, 大气臭氧层被划分为5层, 不用任何前置性臭氧分布假设, 而是直接反演求解遥感方程, 此方法在中国的北京和昆明两站使用了多年^[6,7], 证明其结果稳定而且合理。但是, 考虑到近来臭氧的吸收

1994-09-13收到

* 本研究得到中国科学院大气物理研究所所长基金赞助

系数在国际上有较大的改进,也考虑到近来国际上大量的气球探测所提供的信息,同时,根据多年使用的经验,逆转方法<C>某些表格部分已可以公式化。所以,本文在方法<C>的基础上,并参考最近魏鼎文为 Brewer O_3 仪设计的遥感模式^[8],提出了一个更新的模式。相信它对于研究分析臭氧垂直剖面及其长期演变趋势将是十分有用的。

2 模式

2.1 模式上层方程组

本模式是在逆转方法<C>的基础上改进的。在 30 多年前,魏鼎文就已经从理论上指出,逆转曲线只能给出极为有限的独立信息。在方法<C>中,这个独立信息被估计为 4 个。这一结论与后来的 Mateer^[9]的工作不谋而合。此外,臭氧总量又给出了另一个独立的信息。于是,我们把大气臭氧层分为 5 层,在 36 km 以上,依照火箭探测的结果及光化学理论,臭氧垂直分布基本分为指数分布,其形式可表示为

$$\lg \rho(h) = \lg \rho_0 - 0.0093(h - 36), \quad (1)$$

式中 ρ 为臭氧浓度, ρ_0 为 36 km 高度处的臭氧浓度, h 为高度。

为了计算方便起见,按照上式将 36~54 km 再分为 3 层,每层为均匀分布,其含量由下向上为 $0.739(X - X_1 - X_2)$, $0.204(X - X_1 - X_2)$, $0.057(X - X_1 - X_2)$, 其中 X 是臭氧总量,是已知的。分层如图 1 所示。

需要指出,在 0~5 km 这一层的臭氧含量是根据经验定为臭氧总量的 4%。5 km 以上的各分层意义在于:36 km 以上层,表明光化区域的臭氧含量变化,这对于检验臭氧减少的人为因素的化学假说是重要的。在 28~36 km 这一层,恰好位于光化与动力的混合区域,具有研究价值。21~28 km 层正处于臭氧的主极大层,无疑是重要的。在 21 km 以下,主要属于动力区域,受大气环流的影响特别严重。而在 14 km 以下为对流层,在这个区域里,常常会出现第二个峰值。能够反映出这一峰值,也正是本模式的优点之一。以下我们要给出一些有趣的结果。

本模式采用的是 Dobson O_3 仪里的 C 波长组,它们的最近国际通用吸收系数以及散射系数如表 1 所示。

地面上所接受到的波长为 311.5 nm 的单色天顶散射光,其强度可表示为

$$I = \kappa \beta \int_0^{\rho_0} 10^{-\alpha \lambda - \beta F} d\rho, \quad (2)$$

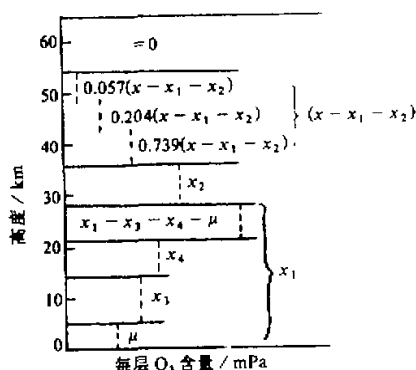


图 1 本模式中 O_3 层的分层

表 1 C 波长组的吸收与散射系数

波长 / nm	α	β
311.5	0.873	0.450
332.4	0.040	0.341

注:表中 α 表示标准状态下 1 cm 厚臭氧的吸收系数,
 β 表示一个大气垂直柱的分子散射系数。

式中 κ 为依赖于太阳天顶角 Z 的一个常数, X 为光线通过总的臭氧厚度, F 为光线通过总的空气质量路径长度, p_0 为地面气压。对波长 $\lambda = 332.4 \text{ nm}$, 则有

$$I = \kappa \beta' \int_0^{p_0} 10^{-x'X - \beta'F} dp. \quad (3)$$

参看图 1, 在第一次求解中, 我们是把大气分为 4 层 (54 km 以上层, 36~54 km 层, 28~36 km 层, 0~28 km 层), 各层的次序是从上到下, 按照文献[5], 则有

$$\lg \left(\frac{I}{I'} \right)_Z - \lg \left(\frac{I}{I'} \right)_{60} = \lg \frac{\left(\frac{A_0 + \sum_1^3 A_r 10^{-xJ_r}}{A'_0 + \sum_1^3 A'_r 10^{-x'J_r}} \right)_Z}{\left(\frac{A_0 + \sum_1^3 A_r 10^{-xJ_r}}{A'_0 + \sum_1^3 A'_r 10^{-x'J_r}} \right)_{60}}, \quad (4)$$

式中 $J_r = X_r - x$, 其中 x 为 O_3 层厚度。

A_r 的表达式为

$$A_r = \int 10^{-\beta F} dp.$$

在(4)式的左边, 观测值 $\lg(I/I')_Z$ 与 $\lg(I/I')_{60}$ 通常以 L_Z 和 L_{60} 来表示。现今

$$C = A'_0 \sum_1^3 + A'_r 10^{-x'J_r},$$

则式(4)就简化为

$$\frac{(A_0 + \sum_1^3 A_r 10^{-xJ_r})_Z}{(A_0 + \sum_1^3 A_r 10^{-xJ_r})_{60}} = 10^{L_Z - L_{60} - \lg C_{60} / C_Z}. \quad (5)$$

下面简单地讨论一下关于气溶胶和二次散射的影响。令其影响参数为

$$Q = u + m(a), \quad (6)$$

其中 u 表征二次散射的影响, 对于确定的波长和 Z 来说是一个常数, 通常把它加在观测值 L 中, 就象文献[5]所做的那样, 令

$$N(x)_Z = \lg(C_{60} / C_Z) - u, \quad (7)$$

这样就有

$$\frac{(A_0 + \sum_1^3 A_r 10^{-xJ_r})_Z}{(A_0 + \sum_1^3 A_r 10^{-xJ_r})_{60}} = 10^{L_Z - L_{60} - N(x)_Z + m(a)}, \quad (8)$$

$m(a)$ 表征气溶胶的影响, 它是非常复杂的气溶胶谱分布及变化的函数, 这无疑会对测定臭氧垂直分布及其趋势起到比较重要的作用。正因为它的复杂性, 在国际上迄今仍未得到满意解决。在这个模式里, 我们假定它是零, 这就意味着只能在晴朗的天气里应用本模式。而在大火山爆发后的 1~2 年之内, 由于平流层的气溶胶存在及其变化, 应用本模式应当谨慎。

下面讨论 $N(X)_Z$ ，其中的常数 C 主要依赖于臭氧的总量，而臭氧的垂直分布本身对它们的影响却很小，因此可用经验公式来表示。把已知分布及观测的 L 值代入式(8)，反过来得到每次相应的 N 值。在此过程中，我们发现 N 的值随着臭氧厚度 X 的变化，显著地呈直线趋势，于是我们选出并应用了近 100 个在北京站观测良好的逆转曲线及由逆转方法 $\langle C \rangle$ 算出的分布。应当说明的是在文献[10]中，已经证明由 $\langle C \rangle$ 法算出的 O_3 上层分布结果是良好的。这里，在应用它们时，已加入了由于吸收系数变化所引起的变化。回归直线如图 2 所示，回归方程为

$$N_{88} = 1.01645 + 0.327x, \quad (9)$$

$$N_{90} = 1.371 + 0.29556x. \quad (10)$$

根据美国标准大气，考虑到地球的曲率，我们计算了常数 A ，结果如表 2 所示。

在 $Z = 88^\circ$ 和 $Z = 90^\circ$ 时，按照权重函数分布形状，观测到的 L 值，基本上与 28 km 以下的臭氧分布无关，因此，用这种方法，我们可以定量地解出上层臭氧分布，由此，给本模式也带来了较客观的结果。

鉴于臭氧路径长度 X 与波长无关，在方法 $\langle C \rangle$ 中对上层模式里的 X 已用了多年，结果稳定可靠。所以，在本模式中，我们仍然加以应用，它们的值如表 3 所示。至此，上层模式已经完成。

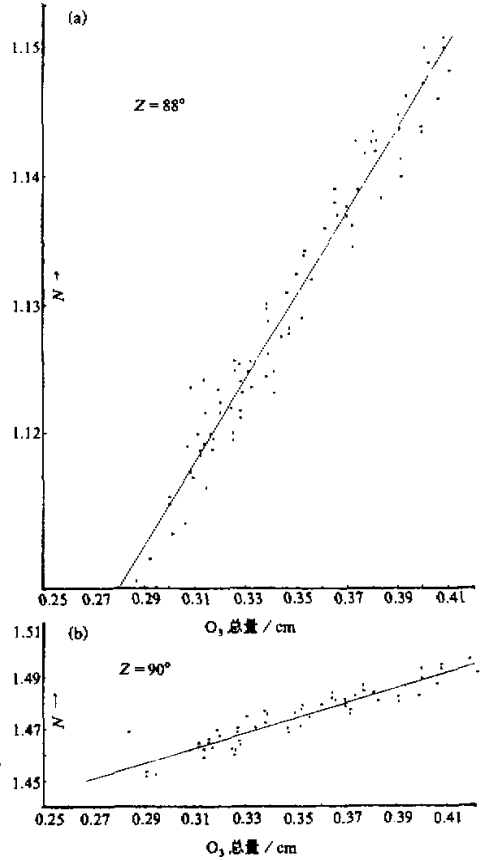


图 2 $Z = 88^\circ, 90^\circ$ 时的 $N(X)$ 的回归直线

表 2 $Z = 60^\circ, 88^\circ$ 和 90° 的 A 值

Z	A_0	A_1	A_2	A_3
60°	0.188	1.6232	6.5881	214.975
88°	0.187	1.5547	3.1846	13.488
90°	0.187	1.4745	2.6436	5.1744

表 3 $Z = 60^\circ, 88^\circ$ 和 90° 的 X 值

	$Z = 90^\circ$	$Z = 88^\circ$	$Z = 60^\circ$
X_0	x	x	x
X_1	$13.3473x - 12.3473x_1 - 12.3473x_2$	$6.5630x - 5.5630x_1 - 5.5630x_2$	$1.2716x - 0.2716x_1 - 0.2716x_2$
X_2	$21.8011x - 20.8011x_1 + 5.0075x_2$	$16.5626x - 15.5626x_1 - 4.7112x_2$	$1.9917x - 0.9917x_1 - 0.4940x_2$
X_3	$11.4214x + 3.2454x_1 + 3.8607x_2$	$10.5405x - 1.4311x_1 + 2.0408x_2$	$1.9756x - 0.4808x_1 + 0.0718x_2$

2.2 模式的中下层方程组

我们在反演求解中下层方程组时，按照权重函数所提出的信息，采用的两个角度分

别是 $Z=83^\circ$ 和 $Z=77^\circ$ 。应该说明, 这里采用 77° , 是因为目前国际上公布的观测数据是 77° 时的观测值。这样, 本模式就具有了通用性, 依据与式(8)相仿的方程 (在同样的假定下, 即 $m(a)=0$), 则有

$$\frac{(A_0 + \sum_{i=1}^6 A_i 10^{-\alpha_i L})^Z}{(A_0 + \sum_{i=1}^6 A_i 10^{-\alpha_i L})_{60}} = 10^{L(Z - L_{60} - N(X)_Z)} \quad (11)$$

由于这次求解是在第一次解的基础上进行的, 即 x_1 将和 x_2 已知。所以, 此方程中实际上仅有两个未知数 x_3 和 x_4 , 而 A 和 X 与上述计算过程完全相似。 $Z=60^\circ$ 、 77° 和 83° 时的 A 值如表 4 所示, 表 5 给出了 $Z=60^\circ$ 、 77° 和 83° 的 X 值。

表 4 $Z=60^\circ$ 、 77° 和 83° 的 A 值

Z	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
60°	0.188	1.6232	6.5881	10.4964	31.699	92.329	74.092
77°	0.188	1.6140	4.7900	9.7600	24.610	42.95	10.08

表 5 $Z=60^\circ$ 、 77° 和 83° 的 X 值

	$Z=83^\circ$	$Z=77^\circ$	$Z=60^\circ$
X_0	x	x	x
X_1	$2.8794x - 1.8794x_1 - 1.8794x_2$	$1.9500x - 0.9500x_1 - 0.9500x_2$	$1.2716x - 0.2716x_1 - 0.2716x_2$
X_2	$7.5451x - 6.5451x_1 - 3.0623x_2$	$4.4000x - 3.4000x_1 - 1.6200x_2$	$1.9917x - 0.9917x_1 - 0.4940x_2$
X_3	$7.0842x - 2.5772x_1 + 0.5360x_2 - 3.5070x_3 - 3.5070x_4 - 3.5070\mu$	$4.3300x - 1.5600x_1 + 0.1390x_2 - 1.6800x_3 - 1.6800x_4 - 1.6800\mu$	$1.9853x - 0.4881x_1 + 0.0069x_2 - 0.4994x_3 - 0.4994x_4 - 0.4994\mu$
X_4	$6.7228x + 0.9440x_1 + 0.4530x_2 - 6.6667x_3 - 3.2308x_4 - 6.6667\mu$	$4.1600x + 0.1980x_1 + 0.0940x_2 - 3.3700x_3 - 1.6200x_4 - 3.3700\mu$	$1.9788x + 0.0151x_1 + 0.0069x_2 - 0.9939x_3 - 0.0945x_4 - 0.9939\mu$
X_5	$6.3703x + 0.7896x_1 + 0.3892x_2 - 2.6708x_3 + 0.4396x_4 - 6.1549\mu$	$4.1300x + 0.1790x_1 + 0.0880x_2 - 1.5500x_3 + 0.0870x_4 - 3.3100\mu$	$1.9717x - 0.0151x_1 + 0.0068x_2 - 0.4883x_3 + 0.0061x_4 - 0.9869\mu$

在用 $Z=77^\circ$ 和 $Z=83^\circ$ 求解中下层臭氧垂直分布时, 对方程(11)中的 $N(X)$, 我们用了大量的气球探测结果来提取臭氧垂直分布的信息量, 以帮助提高解的真实性和客观

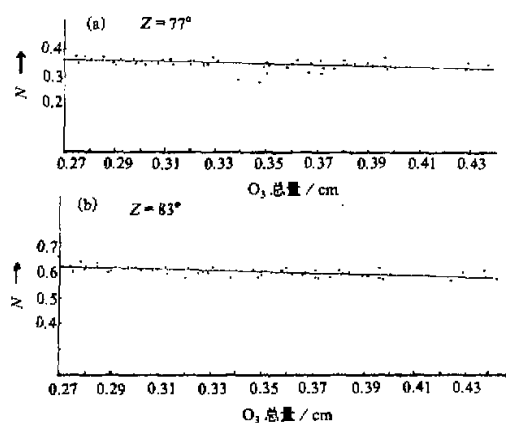


图 3 $Z=77^\circ$ 和 83° 时 $N(X)$ 的回归直线

性。关于气球探测, 我们采用的是中纬度 Boulder 站和 Tateno 站以及 Sapporo 站的臭氧垂直分布的气球探测资料, 其中包括具有一个峰值和有次极大的两个峰值两种分布, 共用了 60 个探测资料, 每次将估计中下层分布与同月逆时针观测 L 值代入方程(11)中, 以求出每天的 $N(X)$ 值。最后得到 $Z=77^\circ$ 和 $Z=83^\circ$ 的 $N(X)$ 的回归直线, 分别如图 3a、b 所示, 它们的回归方程为

$$N_{77} = 0.4326 - 0.2615x, \quad (12)$$

$$N_{83} = 0.6835 - 0.2442x. \quad (13)$$

至此, 本模式的中下层方程组确立, 总模式已完全确立。

3 结果和讨论

按照上述建立的模式 (以下简称 WL 模式), 我们分两步由上往下来解遥感方程。从 Boulder 站, Tateno 站以及 Sapporo 站和北京站选出数百个逆转曲线进行反演计算, 特别是对前 3 个站, 我们选择同时有逆转观测, 气球观测和有按照国际通用模式 (以下简称 IM 模式) 得到的臭氧垂直分布的数据资料^[12], 以便于对 3 者进行对比。在选择的过程中, 我们既有臭氧总量较小的记录, 也有臭氧总量较大的记录。这里以气球直接探测的结果作为比较标准。从整体上看, WL 模式的结果比目前国际通用 IM 模式结果更为客观、合理, 更接近于气球实测的结果。由于篇幅所限, 以下给出 6 个个例, 并作比较说明。在以下个例的图中, (a) 图为 WL 模式的结果, (b) 图为气球探测的结果, (c) 图为 IM 模式的结果, 图中的横坐标为各高度上的臭氧含量, 单位为臭氧含量分压 mPa。

例 1 1986 年 12 月 24 日 Tateno 站的反演与气球探测结果 (图 4)

该日臭氧总量 $X=0.29$ cm, 这是属于臭氧总量较小的个例。从图 4b 可以看出, 这里臭氧最大值层的厚度较窄, 在 14 km 以下含量较少。这一点在图 4a 中也清晰可见, 而图 4c 却较为宽厚, 明显的与气球实测相差较大。另一个重点是, 图 4b 的峰值处于 21~24 km 之间, 这正好在 WL 模式 4a 的峰值之内, 但图 4c 的峰值却偏离了一层, 最大值集中在 24~28.5 km 之间。此外, 在 27 km 以上, 图 4b 的臭氧含量向上递减的甚为迅速, 这与图 4a 的结果是相一致的。而图 4c 的结果与此相差较远。

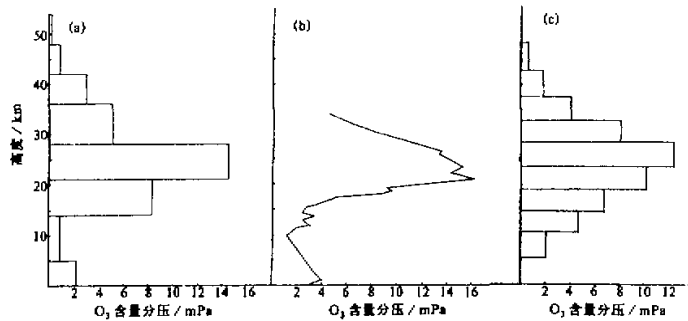


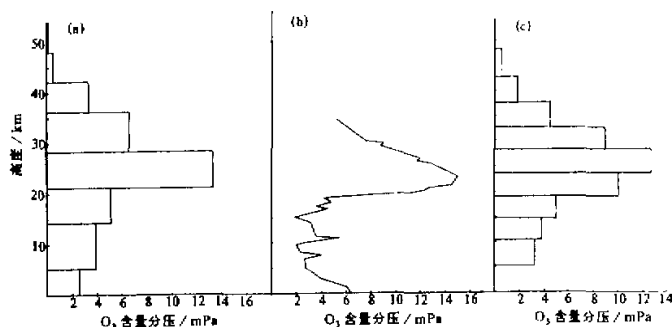
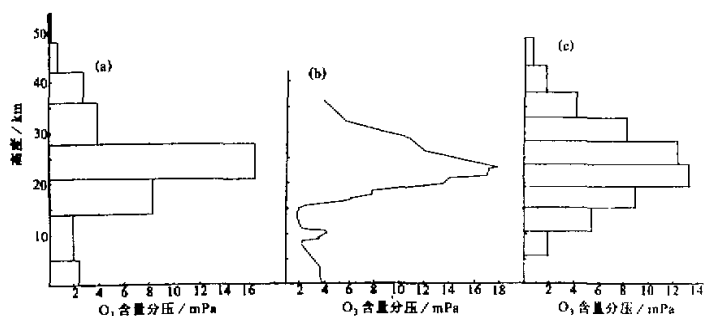
图 4 Tateno 站 3 种同日出测的 O_3 层垂直剖面比较

例 2 1988 年 3 月 23 日 Taateno 站的结果 (图 5)

该日臭氧总量 $X=0.297$ cm, 这也是属于臭氧含量小的个例。本例与图 4 的情况相似。图 5b 最大值所在的高度为 23 km, WL 模式的结果与此相符, 而 IM 模式的结果则与之相差明显。

例 3 1989 年 1 月 4 日 Tateno 站的结果 (图 6)

该日臭氧总量 $X=0.325$ cm, 这是属于中等臭氧含量。但此次臭氧层的厚度也是比

图 5 Tateno 站 3 种同日测出的 O_3 层垂直剖面比较图 6 Tateno 站 3 种同日测出的 O_3 层垂直剖面比较

较窄的, 峰值在 23~24 km 之间, 同样这与 WL 模式结果较为接近, 而图 6c 的通用 IM 模式结果则臭氧厚度较宽, 最大值所在的高度仍有偏移, 不在实际高度层上。

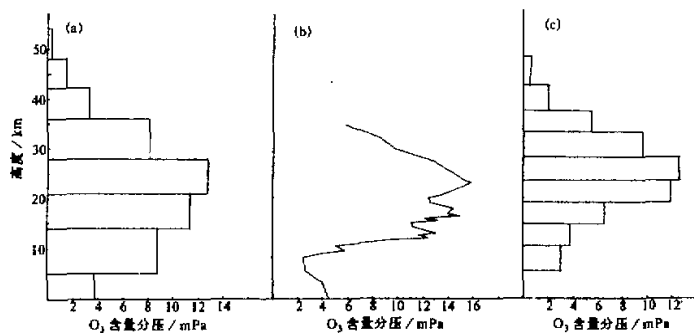
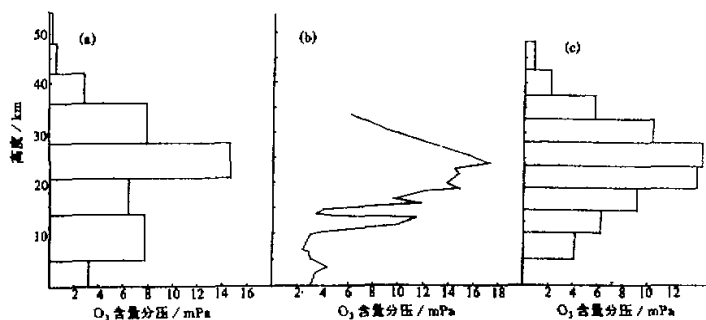
以上 3 个个例还表明, 由 WL 模式算出的最大峰值均较国际通用的 IM 模式结果为大, 或者说与实测结果较为一致。国际通用模式的这种缺点, 前人早已指出^[11], 他们从统计的结果中发现, 这些年来国际通用 IM 模式所得出的臭氧垂直剖面分布, 其峰值均比用气球等直接实测所得结果要小。

例 4 1990 年 4 月 25 日 Sapporo 站的结果 (图 7)

该日臭氧总量 $X=0.429$ cm, 这属于臭氧含量较大的个例。从图中可以看出实际臭氧分布的垂直方向很宽, 在 14~19 km 之间 WL 模式的结果特征突出, 而 IM 模式结果在此区域则较小, 极值所在区域图 7a 与图 7b 比较相近。

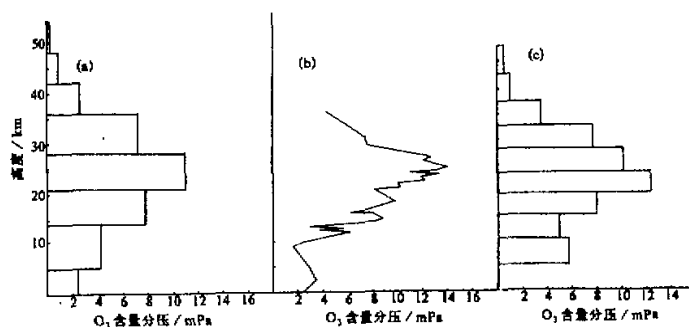
例 5 1990 年 5 月 24 日 Sapporo 站的结果 (图 8)

该日臭氧总量 $X=0.391$ cm, 这一天的臭氧含量也是比较大的。图 8b 表明, 这次的臭氧垂直分布有第二极大值, 在 13.5 与 15.5 km 之间有第二峰值, 它表明对流层的臭氧含量很多, 这在 WL 模式所给的结果中具有类似性, 但在图 8c 中则看不清楚此种分布形式。

图 7 Sapporo 站 3 种同日出测出的 O_3 层垂直剖面比较图 8 Sapporo 站 3 种同日出测出的 O_3 层垂直剖面比较

例 6 1992 年 10 月 6 日 Sapporo 站的结果 (图 9)

该日臭氧总量 $X=0.321$ cm, 属中等含量。虽然此次臭氧总量不是很大, 但分布却较宽, 其最大值在 25 km 处, 这在气球探测和 WL 模式中都有所表现。但这一次在通用 IM 模式中其最大值却在 24 km 以下, 与实测有明显差异。而且在 15 km 以下的走势上也与气球实测不符。

图 9 Sapporo 站 3 种同日出测出的 O_3 层垂直剖面比较

由以上的例子与分析可以看出, WL 模式所给出的结果与实际气球直接结果相比, 较为吻合, 这是通用的 IM 模式所不及的。究其原因, 主要由于臭氧垂直分布的变化多端, WL 模式因不设前置性假设条件, 而比较适应这种情况; 但通用 IM 模式却受前置性条件的限制, 由其所算出的结果在形态上比较单一化, 即形式类同, 变化很少。因而可以说 WL 模式比目前国际上通用的 IM 模式的性能更客观, 更合理, 更接近于实测。

致谢: 作者对中国科学大气物理研究所及曹庆存院士对本课题的支持表示感谢; 对美国 NOAA 的 J.J. Deluisi 博士提供若干臭氧气球探测结果, W.D. Komhyr 博士提供新的臭氧吸收及大气散射系数也表示谢意。

参 考 文 献

- 1 Gotz, F.W.P., A.R. Meetham and G.M.B. Dobson, 1934, The vertical distribution of ozone in the atmosphere. *Proc. Roy. Soc. London*, **A145**, 416~446.
- 2 魏鼎文, 1962, Gotz 逆转效应中 $I_{311.2\text{A}}$ 的有效散射高度上升过程跳跃性及逆转方法 解的不唯一性, 地球物理学报, **11**, 123~135.
- 3 Ramanathan, K.R. and Dave, J.V., 1957, The calculation of the vertical distribution of ozone by the Gotz Umkehr effect (method B), *Annals of G. P.*, **5**, 23~45.
- 4 Mateer, C.L. and H.U. Dutsch, 1964, Uniform evaluation of Umkehr observations from the world ozone network. Part I: proposed standard Umkehr evaluation technique, Boulder, Colorado.
- 5 魏鼎文、林启锦, 1964, 测量大气 O_3 垂直分布的逆转方法 <C> ——对逆转方法 <A> 与 的改进, 地球物理学报, **13**, 260~270.
- 6 魏鼎文、陈辉, 1991, 北京地区臭氧垂直分布的演变趋势与特征的研究——卫星 SBUV 资料与地面遥感对比分析, 地球物理学报, **34**, 415~425.
- 7 王卫国、郭世昌、杨利群, 1990, 大气臭氧层垂直分布及其变化的研究, 地球物理学报, **33**, 639~646.
- 8 Wei Dingwen, 1992, A new Umkehr model for estimating the ozone vertical profile by the Brewer instrument, Scientific Report, Atmospheric Environment Service, Toronto, M3H 5T4, Canada.
- 9 Mateer, C.L., 1964, On the information content of Umkehr observations, *J. Atmos. Sci.*, **21**, 370~381.
- 10 Wei Dingwen, 1992, New evidences supported the Wei hypothesis about the formation of the Antarctic ozone hole, *Asia-Pacific ISY Conference*, Vol. II, 224~228.
- 11 Whitten, R.C. and Prasad, S.S. (Ed.) 1985, *Ozone in the Free Atmosphere*, New York: Van Nostrand Reinhold.
- 12 Canadian Department of the Environment, Ozone Data for the World, 1986~1993.

A New Remote Sensing Model of Atmospheric Ozone Vertical Profile

Wei Dingwen

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese
Academy of Sciences, Beijing 100029)

Liu Yan

(Department of Mathematics, North China
Electric Power University, Beijing 102206)

Abstract On the base of long-term studies and practices in this field, a new Umkehr remote sensing model of atmospheric ozone vertical profile has been presented. Through many calculations and analyses of examples as well as comparing with the results of ozonesonde observation, it has shown that the capability of this model is better than the Umkehr model which is using throughout the world. It means that our model's results are more approximating the objective facts and also more reliable.

Key words atmospheric ozone layer vertical profile remote sensing model