

1990~2002 年北京地区大气臭氧垂直分布 Umkehr 观测反演研究

杨景梅 邱金桓 赵延亮

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 基于标准 Umkehr 反演算法, 利用北京地区 Dobson 仪器逆转观测资料, 反演计算出臭氧垂直分布。在反演过程中加入气溶胶订正因子, 使反演结果更加合理。利用臭氧垂直分布反演结果, 研究 1990~2002 年北京地区臭氧垂直分布特征和变化情况。结果表明在 1992 年秋季和 1993 年春季期间, 在 10.3~23.5 km 范围内臭氧浓度有较大幅度降低, 造成了这个期间月平均臭氧总量的明显偏低; 1990 年到 2002 年期间, 臭氧总量的变化呈现出缓慢下降趋势, 但不同高度臭氧含量的变化趋势有所不同。

关键词 臭氧垂直分布 Umkehr 算法 气溶胶订正

文章编号 1006-9895(2005) 05-0709-08

中图分类号 P414

文献标识码 A

A Study of Umkehr Vertical Ozone Profiles of Beijing During 1990 - 2002

YANG Jing-Mei, QIU Jin-Huan, and ZHAO Yan-Liang

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

Abstract The ozone vertical profiles have been retrieved from the Dobson Umkehr observations of Beijing [$39^{\circ}45'N$, $117^{\circ}00'E$ (before 5 April 1994); $39^{\circ}58'N$, $116^{\circ}22'E$ (after 5 April 1994)] from 1990 to 2002 based on standard Umkehr inversion algorithm. The corrections are made for aerosols in the process of inversion, and the retrieved results have been improved. This paper presents monthly mean ozone profile results of October 1990 and October 1993, and the seasonal average ozone concentration versus time in Umkehr layers 2 - 8 of Beijing in the spring (March, April and May) and fall (September, October and November) of 1990 - 2002. Comparison of these results with those from the Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II (SAGE II) satellite measurements has also been carried out. The spring and fall average ozone concentration variation trends, measured by Dobson spectrophotometer and by SAGE II satellite instrument are in good agreement. Using the derived profiles, combined with the total ozone data measured by Dobson spectrophotometer, the characteristics and variations of ozone vertical distribution of Beijing during 1990 - 2002 are studied. The results show: (i) The aerosol effects tend to produce an apparent decrease in ozone concentration above layer 5 (above 23.5 km), and an apparent increase in ozone concentration in the lower layers. In the case of October 1990, the ozone profile error caused by aerosol [(ozone profile with aerosol correction - uncorrected ozone profile) / uncorrected ozone profile $\times 100\%$] is less than 2.6% (the absolute value) in layers 3 - 6 (14.7 - 32.6 km), and less than 8.7% in layers 7 - 9 (32.6 - 47.9 km). This indicates that during the quiescent years, the effect of aerosols is not obvious. But in the case of October 1993, affected by volcanic eruption of Pinatubo of 1991, the ozone profile error caused by aerosol reached 5.9% (the absolute value) in layers 3 - 6, and reached 18% in layers 7 - 9. So it is necessary to make corrections for aerosols during the periods following strong

volcanic eruptions. (ii) In the fall of 1992 and the spring of 1993, the seasonal average ozone concentrations in layers 2–4, corresponding to the height of 10.3–23.5 km, were unusually lower than normal. In the fall of 1992, the ozone concentrations in layer 4 (19.1–23.5 km, the height of the maximum) was 7.5% lower than normal; in the spring of 1993, the ozone concentrations in layer 3 (14.7–19.1 km) was 31% lower than normal. The ozone concentration reduction in the lower stratosphere caused the total ozone decrease seriously from the fall of 1992 to the spring of 1993. (iii) From 1990 to 2002, the monthly mean total ozone decreased slightly, but the trends of change of ozone concentrations at different altitudes were different: ozone concentrations in layers 2–4 and 7–8 (32.6–42.6 km) had a trend of decrease; but ozone concentrations in layers 5–6 (23.5–32.6 km) presented a trend of increase.

Key words vertical ozone distribution, Umkehr algorithm, aerosol correction

1 引言

大气臭氧垂直分布特征和变化规律研究对地气系统辐射强迫研究, 对气候和环境变化研究以及遥感大气订正等都有重要意义, 是一个关系到全球气候和生态环境变化的重要课题。

在臭氧垂直分布和变化研究方面国内外已有许多工作^[1~3], 而系统可靠的臭氧垂直分布探测资料是这些研究工作的前提。逆转观测作为世界气象组织常规采用的测量臭氧垂直廓线的方法之一, 提供了迄今最长的臭氧垂直分布观测资料。在反演方法上, Mateer 等^[4]提出了一个新的逆转探测臭氧垂直分布的反演算法, 或称标准 Umkehr 算法, 它是目前普遍采用的反演计算方法。但是这种方法在反演计算过程中忽略了气溶胶的影响, 因而使反演计算结果产生一定的偏差。早在标准 Umkehr 算法提出之前, DeLuisi^[5, 6]就研究了气溶胶对 Umkehr 测量结果的影响, 并提出了订正方法。许多学者也在这方面作了探讨和实践^[7, 8]。北京臭氧观测站(香河, 编号 208)作为全球臭氧监测网成员之一, 自 1979 年起使用 Dobson 分光光度计(第 75 号)进行臭氧观测和研究。这台仪器定期同世界标准仪器进行比较和标定, 它的精度已经达到了国际要求。多年来, 该观测站还进行臭氧逆转观测, 积累了大量的资料。充分利用这些资料来研究北京地区臭氧垂直分布特征和变化规律是很有意义的。

本文利用北京地区 1990 至 2002 年臭氧总量和逆转观测资料, 采用标准 Umkehr 反演算法, 反演出臭氧垂直分布廓线, 并在反演过程中加入气溶胶订正因子, 使反演结果更加合理。利用这些反演结果, 研究近 13 年来北京地区臭氧垂直分布特征和变化情况, 并取得了一些有意义的研究成果。

2 资料 and 反演方法

本文采用标准 Umkehr 反演算法^[4], 根据北京臭氧观测站 Dobson 分光光度计观测的臭氧总量和逆转资料, 反演出臭氧垂直分布廓线。

逆转(Umkehr)观测是在日出或日落附近时段, 选择一系列不同太阳天顶角(60°、65°、70°、74°、77°、80°、83°、85°、86.5°、88°、89°和 90°), 用 Dobson 分光光度计的 C 组波长($\lambda_1 = 311.5$ nm, $\lambda_2 = 332.4$ nm)测量天顶散射光光强比值。测量过程中会发现, 比值 $I_{\lambda_2} / I_{\lambda_1}$ 随着太阳天顶角的增大而逐渐增大, 约在 85°天顶角附近达到最大, 然后比值又逐渐减小。这就是所谓的逆转效应。这些天顶散射光光强比值中, 包含着大气臭氧垂直分布的信息。为从中提取大气臭氧信息, 首先定义:

$$N(\theta) = 100 \lg \frac{I_{\lambda_2}}{I_{\lambda_1}} + k, \quad (1)$$

$N(\theta)$ 是一个定义的变量, 反映了 C 组波长天顶散射光光强比值随太阳天顶角的变化。其中, θ 为太阳天顶角, I_{λ_1} 、 I_{λ_2} 是对应波长 λ_1 、 λ_2 的天顶散射光强度, k 是未知常数, 与大气上界太阳辐射通量和仪器性质有关。

根据标准 Umkehr 反演算法^[4], 将大气粗分为 16 层, 使每层顶的气压值等于这层底部气压值的 1/2。各层层底海拔高度如表 1 所示。设 12 层以上臭氧含量不变。将 $N(\theta)$ 进行一阶泰勒展开:

$$N(\theta) = \eta(\theta) + \sum_{i=1}^{12} \frac{\partial \eta(\theta)}{\partial f_i} \Delta f_i + O(\Delta f_i)^2. \quad (2)$$

若不考虑方程(2)右边最后一项, 即二次非线性项, 将非线性问题线性化, 使(2)式变成截断的泰勒展开式, 并将二次非线性项作为非线性问题线性化的误差项, 可得到方程:

表 1 Umkehr 层和对应的层底高度
Table 1 Umkehr layer numbers and layer-base heights

								Umkehr 层 Umkehr layer								
层数 Layer number	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
层底高度 Layer-base height/km	0.0	5.5	10.3	14.7	19.1	23.5	28.0	32.6	37.5	42.6	47.9	53.2	58.3	63.1	67.8	72.2

$$\sum_{i=1}^{12} \frac{\partial \eta(\theta)}{\partial f_i} \Delta f_i \cong N(\theta) - \eta(\theta). \quad (3)$$

这实际上是运用了求解非线性泛函方程普遍采用的牛顿法。其中, $N(\theta)$ 是太阳天顶角为 θ 时, C 组波长天顶散射光光强比值的测量值(经过多次散射和折射订正); $\eta(\theta)$ 是根据标准臭氧垂直廓线, 应用球面大气一次散射辐射传输方程计算出的天顶散射光光强比值的对数; $\Delta f_i = \ln(x_i / x_0)$, x_i 和 x_0 是第 i 层臭氧含量的计算值和初始猜测值。在这里, 标准臭氧垂直廓线作为初始猜测廓线, 是参考文献[4], 根据臭氧总量、纬度和观测时间计算出来的。

将(3)式写成矩阵形式:

$$\mathbf{K} \mathbf{f} = \mathbf{u}, \quad (4)$$

其中, $\mathbf{K}$ 为一次变分矩阵($I \times J$ 维矩阵, 其中 I 是天顶角数, J 是臭氧层数); $\mathbf{f}$ 代表 $f_1, f_2, \dots, f_J$; $\mathbf{u}$ 代表 $u_1, u_2, \dots, u_I, u_i = N(\theta) - \eta(\theta)$ 。

在计算过程中, 需要将每一个天顶角对应的 N 值都减去初始点, 即 60° 的 N 值, 以消去未知常数 k 。另外, 还需要加上一个保持臭氧总量的强迫方程。

直接反演(4)式的解法是在方程两边同乘以 $\mathbf{K}^{-1}$ (矩阵 $\mathbf{K}$ 的逆矩阵), 并将二次非线性项作为矢量 $\mathbf{u}$ 的订正值。但是, 由于 Umkehr 测量中所含的信息量较少, 用这种方法求出的解往往不稳定, 需要用光滑解技术或统计解法使解稳定、结果合理。为得到比较稳定、合理的臭氧垂直分布廓线, 采用最优统计解法求解(4)式。最优统计解法的优点在于不需要选定合适的光滑算子或函数, 解法本身已经包含了这种过程。

运用最优统计解法求解(4)式, 可得到迭代方程组:

$$\delta \mathbf{X}_{n+1} = (\mathbf{S}_X^{-1} + \mathbf{K}_n^T \mathbf{S}_E^{-1} \mathbf{K}_n)^{-1} \mathbf{K}_n^T \mathbf{S}_E^{-1} \cdot \{[\mathbf{Y} - \mathbf{Y}(x_n)] - \mathbf{K}_n(\mathbf{X}_0 - \mathbf{X}_n)\}, \quad (5)$$

其中, $\delta \mathbf{X}_{n+1} = \mathbf{X}_n - \mathbf{X}_0$, $\mathbf{X}_n$ 和 $\mathbf{X}_0$ 分别为第 i 层臭氧

含量的对数和作为初始猜测值的标准臭氧含量的对数; $\mathbf{Y} = \mathbf{N} - \mathbf{N}_{60}$; $\mathbf{Y}(x_n) = \eta(x_n) - \eta_{60}(x_n)$, $\mathbf{Y}(x_n)$ 是根据第 n 次迭代所得的臭氧垂直廓线和球面大气一次散射辐射传输方程计算出来的; $\mathbf{S}_X$ 为初始猜测值的误差协方差矩阵; $\mathbf{S}_E$ 为观测误差的协方差矩阵; 上标“ -1 ”和“ T ”分别代表逆矩阵和转置矩阵; n 是迭代次数。在一定条件下, $\mathbf{X}_n$ 会收敛到一个 $\mathbf{X}$, $\mathbf{X}$ 就是所求的解。

考虑到大气中存在气溶胶粒子, Dobson 仪器接收到的天顶散射光中不仅包含大气分子散射和臭氧吸收的信息, 同时也包括了气溶胶的贡献。在逆转观测中, 若不考虑大气气溶胶的影响, 会使反演结果产生偏差。因此, 需要对测量值进行气溶胶订正。根据 DeLuisi^[5, 6]提出的订正方法, (3)式应写成:

$$\sum_{i=1}^{12} \frac{\partial \eta(\theta)}{\partial f_i} \Delta f_i = N(\theta) - \Delta N - \eta(\theta), \quad (6)$$

$$\Delta N = N_{a+m} - N_m. \quad (7)$$

其中, ΔN 是气溶胶订正因子; N_{a+m} 是考虑到气溶胶影响情况下计算出来的 N 值; N_m 是纯分子大气条件下计算出来的 N 值。

在确定气溶胶消光系数廓线时, 地面的消光系数根据当天的地面能见度资料经验确定; $0 \sim 2$ km 范围内的消光系数分布根据地面消光系数, 假设消光系数随高度呈指数递减, 标高为 1.2 km 计算出来; $2 \sim 12$ km 的消光系数分布, 根据国际气象与大气物理协会(IAMAP)辐射委员会提出的标准辐射大气模型中对流层大气气溶胶廓线来确定^[9]; 平流层中下层消光系数分布根据 SAGE II 卫星资料^[10]确定; 35 km 以上消光系数忽略不计。

本文在作气溶胶订正时, 根据辐射传输方程和气溶胶消光系数廓线, 计算出气溶胶订正因子, 对观测结果进行气溶胶订正, 再根据(5)式反演出臭氧垂直廓线。

3 结果和分析

图 1 和图 2 分别是北京 1990 年和 1993 年 10 月平均臭氧垂直分布图, 图中实线是利用标准 Umkehr 算法并加入气溶胶订正反演出的廓线, 虚线是未考虑气溶胶影响反演出的廓线, 图中还同时给出了 SAGE II 卫星探测结果。SAGE II 卫星探测结果是根据与北京相邻的四个点的卫星探测数据计算出来的。从图 1、2 中可以看出: 利用 Umkehr 算法反演得到的臭氧垂直分布结果同卫星探测结果有较好的吻合; 从图 1、2 中还可以看出: 加入气溶胶订正和未加入气溶胶订正的廓线相比, 未加入气溶胶订正的廓线在下层偏大而上层偏小。具体的计算结果为: 气溶胶的影响使得臭氧垂直分布反演廓线在 1~4 层(23.5 km 以下)偏大, 在 5 层以上(23.5 km 以上)偏小。在以下分析中将提到的气溶胶引起的臭氧垂直分布反演偏差是指: (加入气溶胶订正-未加入气溶胶订正)/未加入气溶胶订正 $\times 100\%$ 。从图 1 中可以看出: 气溶胶的影响不明显, 加入和未加入气溶胶订正的两条曲线在臭氧极大值附近几乎重合。其中在 3~6 层(14.7~32.6 km)气溶胶引起的臭氧垂直分布反演偏差非常小, 偏差绝对值小于 2.6%; 在 7~9 层(32.6~47.9 km)偏差小于 8.7%。这说明在火山平静期(根据 SAGE II 卫星探测结果, 平流层气溶胶光学厚度为 0.007), 气溶胶对臭氧垂直分布反演结果影响不明显。从图

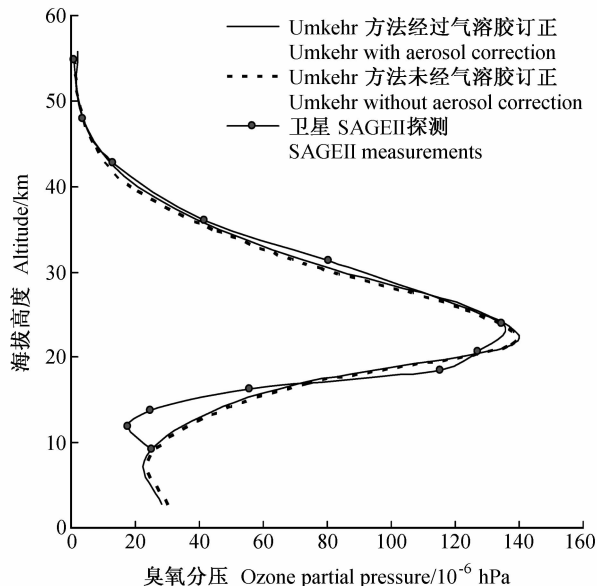


图 1 北京 1990 年 10 月平均臭氧垂直分布

Fig. 1 Average ozone profiles of Beijing in October 1990

2 中可以看出: 1993 年 10 月气溶胶的影响明显比 1990 年 10 月大。受 1991 年 6 月皮纳图博火山爆发的影响, 1993 年 10 月平流层气溶胶光学厚度明显增大(根据 SAGE II 卫星探测结果, 平流层气溶胶光学厚度为 0.025), 此时, 气溶胶引起的臭氧垂直分布反演偏差绝对值在 3~6 层可达 5.9%, 在 7~9 层可达 18.0%。此时, 在反演过程中进行气溶胶订正是非常必要的。

图 3 和图 4 分别是北京 1990~2002 年春季(3~5 月)和秋季(9~11 月)2~8 层臭氧含量以及臭氧总量的分布图。其中臭氧总量是使用 Dobson 分光光度计的 A 组(305.0 nm 和 325.0 nm)和 D 组(317.5 nm 和 339.9 nm)波长, 通过对太阳直射辐射强度比的观测计算出来的。考虑到受方法本身限制, 地基 Dobson 仪器逆转探测臭氧垂直分布的有效范围是 4~8 层(约 19~43 km)^[4], 在这里, 我们选择 2~8 层来进行分析。由于逆转观测需要选择晴天条件下进行, 观测工作主要集中在春季和秋季, 因此, 我们分别采用春季和秋季三个月平均值进行分析。

从图 3 中可以看出: 在春季, 1993 年臭氧含量在 2~4 层(10.3~23.5 km)明显偏低, 在 5~8 层则没有明显的变化。在第 3 层, 即 14.7~19.1 km 范围内, 臭氧含量偏低得非常明显, 比平均值偏低达 31%。从图 3 中还可以看出, 1990~2002 年 2~4 层臭氧含量呈缓慢下降趋势, 5~6 层(23.5~

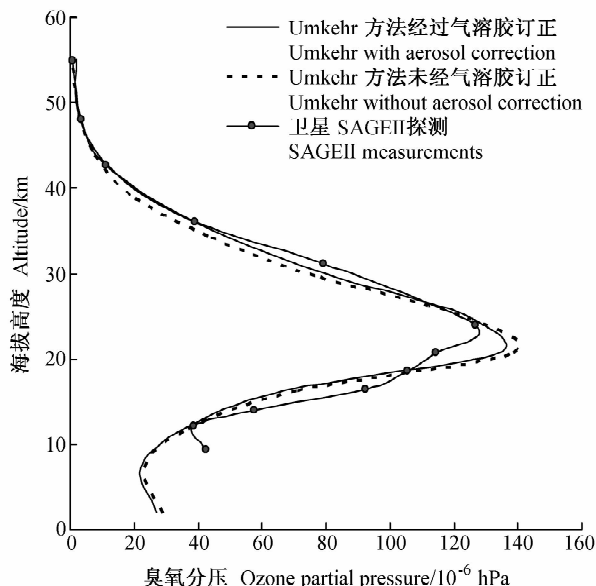


图 2 北京 1993 年 10 月平均臭氧垂直分布

Fig. 2 Average ozone profiles of Beijing in October 1993

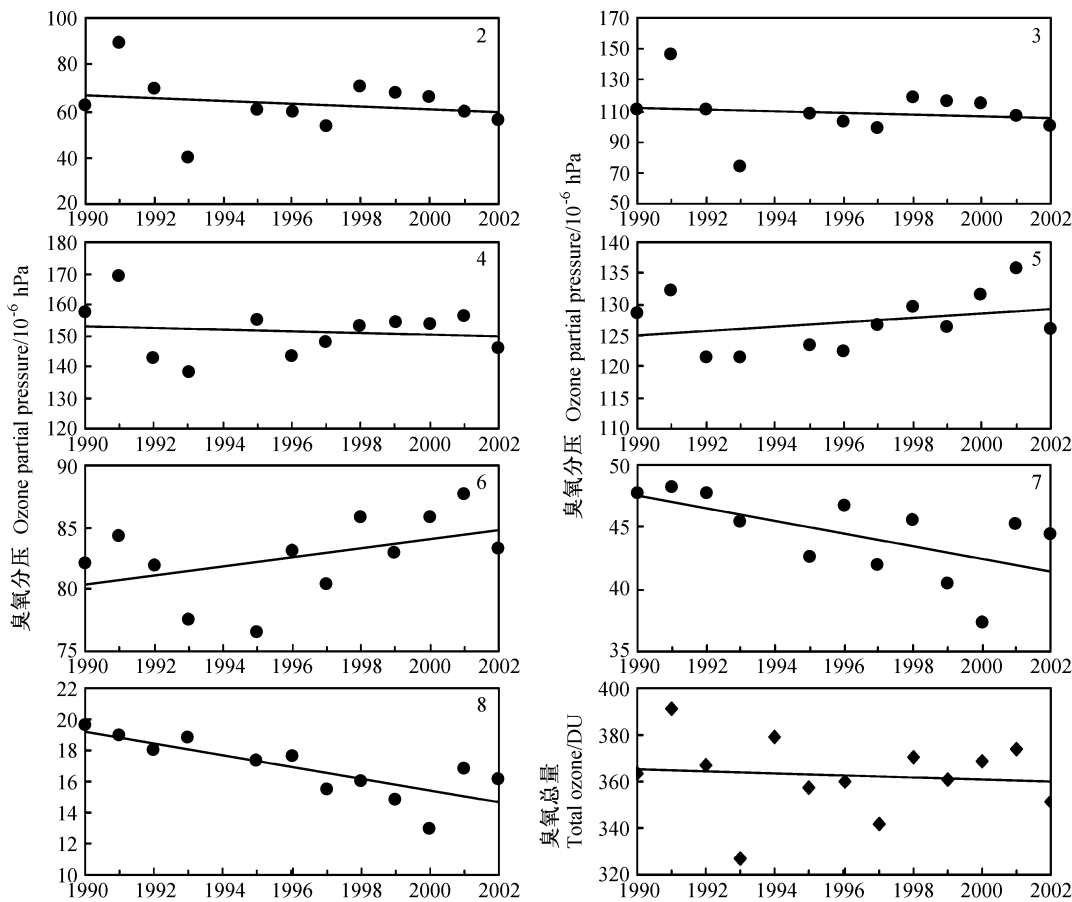


图 3 北京 1990~2002 年春季(3~5 月)2~8 层(与图中数字对应)臭氧含量(单位: 10^{-6} hPa)和臭氧总量(单位: DU)分布
Fig. 3 Spring average ozone concentration (units: 10^{-6} hPa) versus time in Umkehr layers 2 - 8 of Beijing for 1990 - 2002. The last panel shows a plot of total ozone (units: DU) corresponding to the total ozone measurement data. The straight lines are the least squares linear fits for slope

32.6 km)臭氧含量呈上升趋势,7~8 层(32.6~42.6 km)臭氧含量又呈下降趋势。由于缺少 1994 年逆转观测资料,而 1994 年臭氧总量较平均值明显偏大,因此,若加上 1994 年的贡献,2~4 层臭氧含量的下降趋势会更加明显。从图 3 中臭氧总量分布来看,1990~2002 年,春季臭氧总量呈缓慢下降趋势。在这里,臭氧总量的单位用 Dobson 单位(DU)表示,它是指垂直大气柱中所含臭氧总量,被压缩到标准状况下所具有的等效厚度,1 DU 相当于 10^{-3} cm。

从图 4 中可以看出,在秋季,1992 年臭氧含量在 2~4 层偏低,尤其在第 4 层偏低得非常明显。在第 4 层臭氧含量较平均值偏低达 7.5%。从图 4 中还可以看出,1990~2002 年 2~4 层臭氧含量呈缓慢减少趋势,5~6 层臭氧含量呈增加趋势,7~8 层臭氧含量又呈减少趋势;1990~2002 年,秋季臭氧总量同样呈缓慢减少趋势。

图 5 和图 6 分别是根据卫星 SAGE II 探测结果计算的北京 1990~2002 年春季(3~5 月)和秋季(9~11 月)22 km、26 km、30 km 和 34 km 高度臭氧含量分布图。从图 5、6 中可以看出:北京春季和秋季 1990~2002 年臭氧含量在 22 km 和 34 km (分别位于第 4 层和第 7 层)呈减少趋势;在 26 km 和 30 km(分别位于第 5 层和第 6 层)呈增加趋势。这说明在不同高度范围内臭氧含量变化趋势方面,卫星 SAGE II 探测结果同地基 Umkehr 测量结果是相符的。

图 7 为北京 1990~2002 年月平均臭氧总量分布图,从图中可以看出:除了臭氧总量的季节变化和准两年波动以外,在 1992 和 1993 年,月平均臭氧总量明显偏低;从变化趋势来看,从 1990 到 2002 年月平均臭氧总量呈缓慢下降趋势。

通过以上比较和分析可以看出:1992 年秋季和 1993 年春季 10.3~23.5 km 范围内臭氧含量比

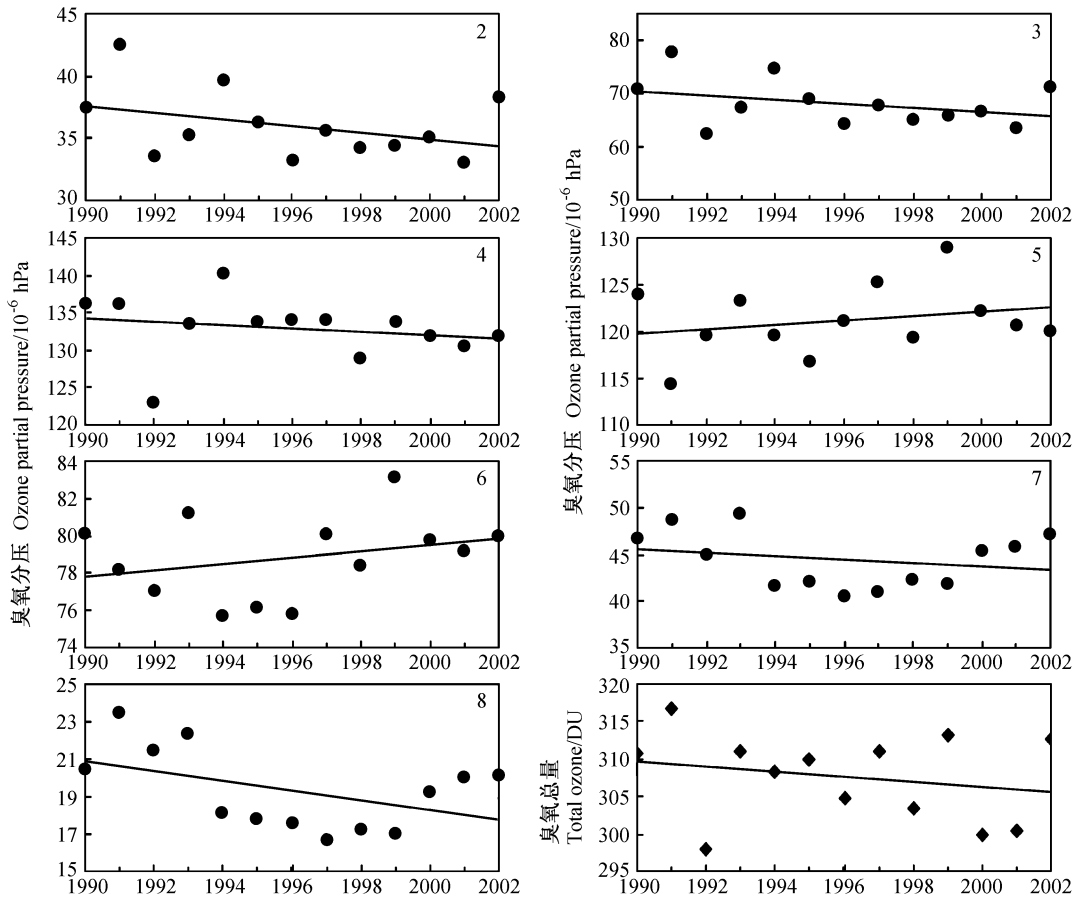


图 4 同图 3, 但为秋季(9~11 月)
Fig. 4 Same as Fig. 3, but for the falls of 1990 - 2002

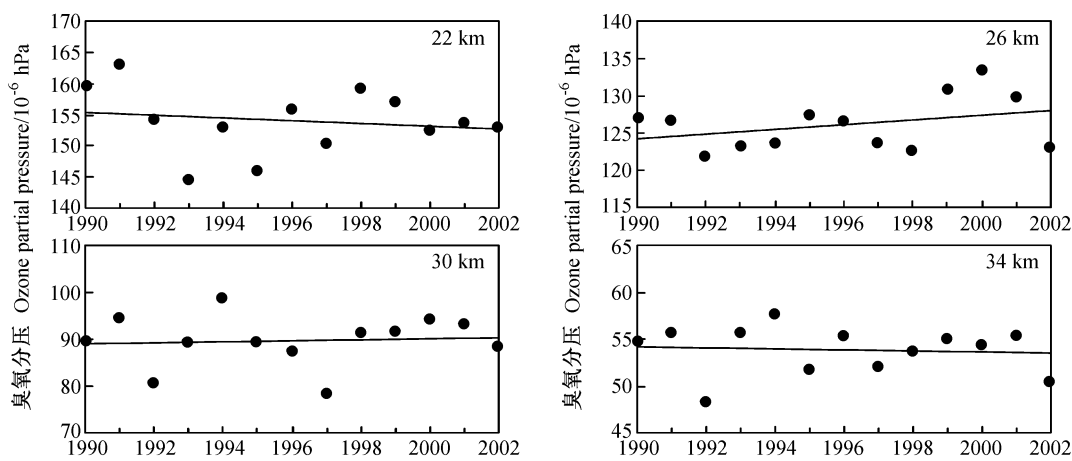


图 5 卫星 SAGE II 探测北京 1990~2002 年春季(3~5 月)不同高度臭氧含量(单位: 10^{-6} hPa)分布
Fig. 5 Spring average ozone concentration (units: 10^{-6} hPa) measured by SAGE II versus time at the altitudes of 22, 26, 30, and 34 km of Beijing for 1990 - 2002. The straight lines are the least squares linear fits for slope.

常年明显偏低, 并由此造成了 1992 年秋季和 1993 年春季臭氧总量的异常下降。虽然不同高度上臭氧含量变化趋势有所不同, 但各层臭氧含量变化趋势在春季和秋季是一致的。各层臭氧含量变化产生的总效果是使 1990~2002 年春季和秋季臭氧总量呈缓慢下降趋势。

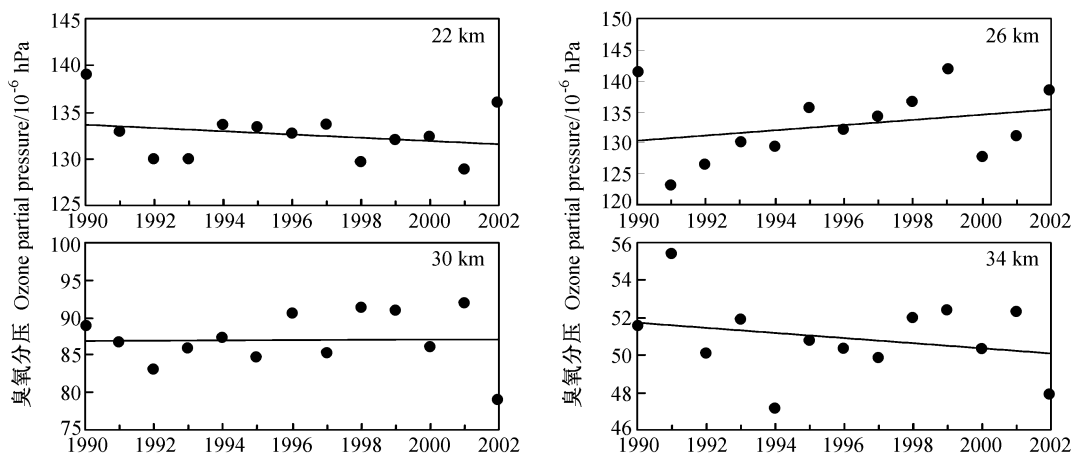


图 6 同图 5, 但为秋季(9~11 月)
Fig. 6 Same as Fig. 5, but for the falls of 1990 - 2002

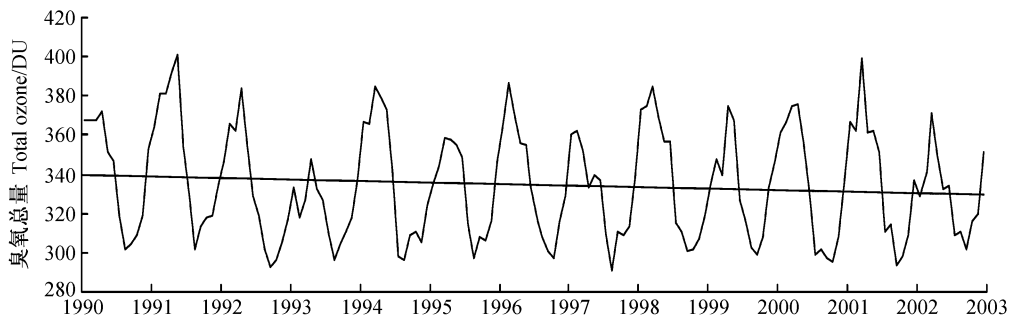


图 7 北京 1990~2002 年月平均臭氧总量分布
Fig. 7 Monthly mean total ozone versus time for Beijing. The straight line is the least squares linear fits for slope

在我国昆明和全世界许多地区都发现了^[11] 1992 年秋季到 1993 年春季臭氧总量异常下降的现象。通过对臭氧垂直分布状况进行分析,可以看出臭氧总量的异常下降主要是由于平流层中下层约 10.3~23.5 km 范围内臭氧含量的大幅度降低。虽然有许多因素可以影响臭氧总量和垂直分布的变化,例如:太阳活动、大气环流的准两年振荡等,但这种大幅度的降低正好发生在 1991 年 6 月皮纳图博火山爆发后的 2 年内,而且臭氧总量普遍下降的现象也同样出现在 1982 年厄尔奇琼火山爆发后的 1983 年^[7],因此,我们推断臭氧总量的异常下降,主要是由于火山爆发引起的。火山爆发将大量的硫酸盐气溶胶输入到平流层,然后通过一系列复杂的光化学反应消耗臭氧层。在这方面已有一些研究^[12, 13],但具体的过程和机制是复杂的,还有待于进一步研究。

4 总结

本文利用北京地区 1990~2002 年 Dobson 逆转观测资料,采用标准 Umkehr 算法,并考虑到气溶胶的影响,反演计算出臭氧垂直分布。结合月平均臭氧总量资料,通过对比分析,得到以下结论:

(1) 气溶胶的影响,使得臭氧垂直分布反演结果在 1~4 层偏大,在 5 层以上偏小。火山爆发后,平流层气溶胶光学厚度增大,此时,气溶胶对臭氧垂直廓线的影响更加明显。

(2) 1992 年秋季和 1993 年春季,臭氧含量在 2~4 层,即 10.3~23.5 km 范围内比常年明显偏低;平流层中下层臭氧含量的降低,造成了 1992 年秋季到 1993 年春季期间月平均臭氧总量的明显偏低。

(3) 从 1990~2002 年臭氧含量变化趋势来看,臭氧含量在 2~4 层呈缓慢下降趋势,在 5~6 层呈

上升趋势, 在 7~8 层又呈下降趋势; 臭氧总量的变化呈缓慢下降趋势。

参考文献 (References)

- [1] Lacoste A M, Godin S, Megie G. Lidar measurements and Umkehr observations of the ozone vertical distribution at the Observatoire de Haute-Provence. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1992, **54**: 571~582
- [2] 王庚辰. 大气臭氧垂直分布的直接测量. 科学通报, 1992, **37**: 863~864
Wang Gengchen. Direct measurements of ozone vertical distribution in the atmosphere. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1992, **37**: 863~864
- [3] 石广玉, 许黎, 郭建东, 等. 大气臭氧与气溶胶垂直分布的高空气球探测. 大气科学, 1996, **20**: 401~407
Shi Guangyu, Xu Li, Guo Jiandong, et al. Balloon observation of atmospheric ozone and aerosols. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1996, **20**: 401~407
- [4] Mateer C L, DeLuisi J J. A new Umkehr inversion algorithm. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1992, **54**: 537~556
- [5] DeLuisi J J. A study of the effect of haze upon Umkehr measurements. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1969, **95**: 181~187
- [6] DeLuisi J J. Umkehr vertical ozone profile errors caused by the presence of stratospheric aerosols. *Journal of Geophysical Research*, 1979, **84**: 1766~1770
- [7] DeLuisi J J, Longenecker D U, Mateer C L, et al. An analysis of northern middle-latitude Umkehr measurements corrected for stratospheric aerosols for 1979~1986. *Journal of Geophysical Research*, 1989, **94**: 9837~9846
- [8] 张毅平、周秀骥、薛庆渝. Brewer 分光光度计遥感大气臭氧垂直廓线的研究. 应用气象学报, 1994, **5**: 444~453
Zhang Yiping, Zhou Xiuxi, Xue Qingyu. A study of remote sensing ozone vertical profile in the atmosphere using Brewer ozone spectrophotometer. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1994, **5**: 444~453
- [9] McClachey R E, Bolle H J, Kondratiev K Y. Report of the IAMAP Radiation Commission Working Group on a Standard Atmosphere. WMO/ IAMAP 1980
- [10] McCormick M P, Veiga R E. SAGE II measurements of early Pinatubo aerosols. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**: 155~158
- [11] 魏鼎文, 赵延亮, 秦芳, 等. 中国北京和昆明地区大气臭氧层的异常变化. 科学通报, 1994, **39**: 1509~1511
Wei Dingwen, Zhao Yanliang, Qin Fang, et al. Abnormal variation in atmospheric ozone layer over Beijing and Kunming. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1994, **39**: 1509~1511
- [12] Solomon S, Portmann R W, Garcia R R, et al. The role of aerosol variations in anthropogenic ozone depletion at northern midlatitudes. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101**: 6713~6727
- [13] 杨理权, 邱金桓, 赵延亮. 火山气溶胶对北京地区臭氧总量变化趋势的影响. 大气科学, 1998, **22**: 686~692
Yang Liquan, Qiu Jinhuan, Zhao Yanliang. Effects of volcanic aerosol on ozone change trends over Beijing. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**: 686~692