

大气臭氧与气溶胶垂直分布的高空气球探测^{*}

石广玉^{**} 许 黎^{**} 郭建东 张豹武 孙宝来^{***}

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

龚知本 周 军 谭 锐

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

岩坂泰信 林 政彦 长谷正博

(日本名古屋大学太阳地球环境研究所, 日本名古屋 464)

摘 要 本文给出了1993年9月12日利用高空科学气球在河北省香河地区探测到的大气臭氧和气溶胶的垂直分布。结果发现: (1) 大气臭氧的数密度在整个对流层较低($\sim 10^{12}$ mol/cm³), 并从地面到对流层顶略有下降; 对流层顶以上开始快速增加, 极值层高度在 ~ 24 km, 其值为 4.78×10^{12} mol/cm³; 臭氧分压有类似的分布特征, 极值 146×10^{-4} Pa, 位于同一高度; (2) 在平流层低层, 臭氧分压有一个次极值 62×10^{-4} Pa, 位于15~16 km; (3) 0~30 km大气气溶胶数密度呈现出三个峰值: 143, 8*和1.1个/cm³, 分别位于近地面、5 km和21 km; (4) 气溶胶的数密度谱在对流层为双模态; 在平流层, 次峰消失。同时, 我们还与其他观测结果作了比较分析。

关键词 臭氧 气溶胶 高空气球

1 引言

臭氧是大气中一种重要的微量气体, 其浓度和垂直分布的变化不但影响到达地面的太阳紫外辐射并进而影响地球生态系统, 而且直接影响平流层的温度结构和地气系统的辐射收支, 从而影响地球气候。最近的研究结果表明^[1]: 大气臭氧的气候效应不仅依赖于它的柱含量, 也依赖于它在大气中的垂直分布。另一方面, 南北半球中、高纬度地区所观测到的平流层臭氧的减少可能与平流层大气气溶胶粒子有关。发生在气溶胶颗粒表面上的非均相反应在破坏O₃方面可能比均相反应更有效^[2]。因此, 同时测量大气臭氧和气溶胶的垂直分布是非常有意义的。本文给出1993年9月12日中国科学院大气物理研究所、安徽光学精密机械研究所与日本名古屋大学太阳地球环境研究所合作进行的大气臭氧和气溶胶垂直分布的气球探测结果。这是继1984年第一次中日合作探测大气臭氧和气溶胶垂直分布以来^[3,4], 又一次成功的中日合作高空科学气球大气成分的探测。

1995-02-14收到, 1995-07-19收到修改稿

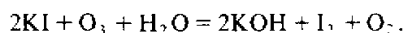
^{*} 国家自然科学基金资助项目

^{**} 现在在国家气候中心

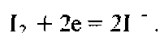
^{***} 王标、樊小标、王令霞、黄小敏、吴德阳、陈丽琼、李立群、魏大庆等同志参加了本文的部分工作

2 仪器与观测

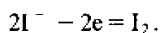
观测大气臭氧所使用的仪器是日本明星株式会社生产的 RSII—KC79D 型电化学臭氧探空仪。其测量原理是：当外部空气通过碘化钾溶液时，空气中的 O_3 与 KI 发生反应，生成气体碘^[3]：



如果在溶液中插入两个电极，并在阴极上加入不大的电压（12 V），那么 I_2 分子将向阳极移动，并在其附近变成离子：



然后，这些碘离子将在电场作用下奔向阳极并在其附近还原为碘分子：



这样所生成的离子电流（迁移电荷）与在单位时间内同溶液发生反应的臭氧量成正比。因此，测量溶液中所流过的电流即可得到大气中的 O_3 含量。

为便于高空气球观测，我们将 O_3 探空仪输出的电流信号通过气球遥测信道传送到地面。同时，为了提高观测结果的精度，在计算中考虑了大气压力、温度和反应液温度随高度的变化，以修正气球飞行过程中空气流量和输出电流的变化。

测量大气中气溶胶粒子数密度的仪器是安徽光学精密机械研究所研制的光散射粒子计数器，共有 17 个通道。在 0~15 km 的大气对流层，可测粒子的半径区间为 0.198、0.235、0.287、…、16.3 μm ；而在 15 km 以上的平流层，考虑到大粒子的数量相对较少，相应的半径区间为 0.208、…、5.10 μm 。光学粒子计数器用已知大小的复折射率为 1.592-0.00i 的聚苯乙烯（乳胶）球形粒子进行标定。当然，实际的气溶胶谱分布依赖于气溶胶的复折射指数。本文中用于散射光强计算的复折射指数 m 分别设定为，对流层： $m=1.5-0.02i$ ；平流层： $m=1.45-0.00i$ ^[5]。与之相对应的气溶胶的粒径范围一如上述。粒子计数器空气样品进气孔的额定流速为 300 mL/min，在气球升空飞行过程中需进行气压订正，以求得实际流速。气溶胶数密度测量的总的误差约为 10%。

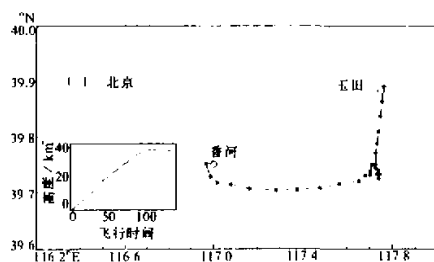


图1 气球飞行轨迹和飞行高度—时间图

装载臭氧探测仪、光散射粒子计数器等观测仪器的吊舱重 225 kg，运载观测吊舱的气球体积为 30,000 m^3 。1993 年 9 月 12 日 17 时 58 分气球在河北省香河县大气物理研究所高空科学气球基地（39.45°N，117.0°E）平缓升空，平均升速为 350 m/min。在历时约 100 min 的升空过程中，气球一路向东，升到 34 km 左右的高度后，气球折向北，平飞 35 min。然后，按照地面控制系统的切割指

令, 气球与吊舱分离。吊舱在降落伞的缓冲作用下, 安全降落在河北省玉田县境内, 距气球发放基地约 67 km。气球的飞行轨迹和飞行高度—时间图, 见图 1。观测当日地面处在冷锋过境后, 高空则基本上处于西风气流控制之中。

3 结果与讨论

本次观测所得到的大气温度廓线示于图 2。大气 O_3 的垂直分布分别以臭氧数密度、分压和混合比等不同单位示于图 2 和图 3。从图 2 中的温度廓线可以看到, 观测当日的近地面气温接近 300 K, 对流层顶的高度约在 14 km, 温度为 212.8 K。之后, 温度缓慢上升到 30 km 左右的 228 K。无论是对流层顶的温度, 还是 30 km 左右的气温, 均低于中纬度夏季模式大气^[6]。

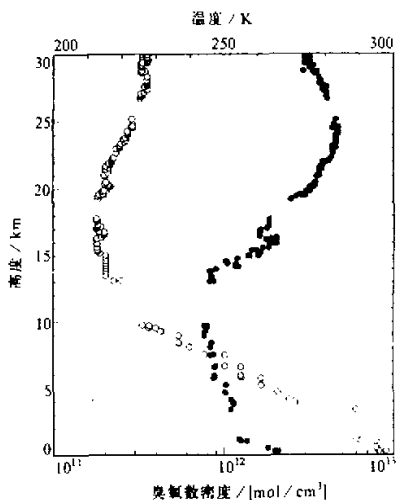


图 2 大气温度 (○) 与臭氧数密度 (●) 的垂直分布

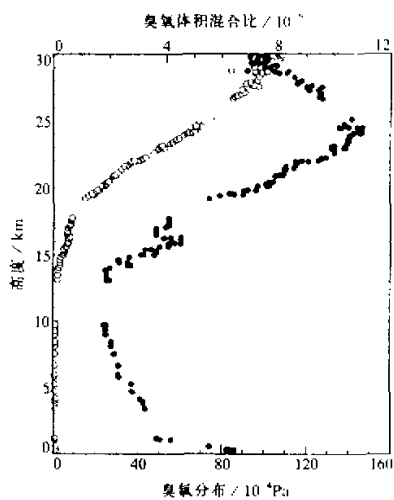


图 3 大气臭氧分压 (●) 与混合比 (○) 的垂直分布

就臭氧的数密度 (图 2) 和分压 (图 3) 而言, 其共同特征是: 在整个对流层内, 从地面随高度而下降, 到达对流层顶以后转变为随高度急剧增加, 形成平流层臭氧层, 极值在 24 km 附近。然后, 随高度的增加再次减少。除近地面层以外, 臭氧数密度在对流层的大部分高度上均小于 10^{12} mol/cm³; 而 24 km 附近的平流层浓度极大值为 4.78×10^{12} mol/cm³。对流层的臭氧分压一般小于 80×10^{-4} Pa, 平流层极大值为 146×10^{-4} Pa。

与美国标准大气 (1976) 的中纬度臭氧模式 (MLOM)^[7] 相比, 本次观测所得到的对流层, 特别是近地面层臭氧浓度要高得多。例如, 在 2 km 高度, MLOM 的臭氧数密度和分压分别为 6.8×10^{11} 分子/cm³ 和 26×10^{-4} Pa, 大致是这次观测所得到的对应值

的 50%。另一方面, MLOM 的平流层臭氧峰值浓度出现在 22 km, 对应的数密度和分压分别为 4.86×10^{12} 分子/cm³ 和 147×10^{-4} Pa。如上所述, 本次观测所得到的峰值浓度高度大约在 24 km, 偏高 2 km, 但峰值浓度本身略低。最近二十年来的地面和卫星观测表明, 主要由于人类活动的影响, 地面和对流层的大气 O₃ 浓度在增加, 而平流层的 O₃ 浓度在减少。与 MLOM 相比, 本次的气球观测结果定性地与近年来全球大气 O₃ 浓度的变化趋势一致。

另一种表示大气 O₃ 浓度的方法是使用 O₃ 浓度与空气浓度之比, 即混合比, 如图 3 中所示。由图可见, 臭氧的混合比从地表面开始增加, 但在整个对流层, 其值均小于 0.25×10^{-6} (混合体积比)。从对流层顶开始, O₃ 混合比有较大增加, 到 30 km 达到 9.0×10^{-6} (混合体积比)。由于本次气球飞行高度所限, 未能探测到混合比的极大值。一般来说, 其极值高度比臭氧数密度和分压的极值高度要高得多。这是因为根据混合比的定义, 臭氧体积混合比 R 等于臭氧分压 P_{O_3} 与空气压力 P 之比, 即: $R = P_{O_3} / P$ 。在对流层, 空气的压力比臭氧的分压大得多, 故 R 值很小; 进入平流层, 两者随高度的相对变化开始改变。到了臭氧含量的极值层后, 由于气压的减小仍然很快, 而臭氧含量的减小较缓慢, 所以混合比在臭氧分压下降时继续上升, 其极值高度也随之上升。

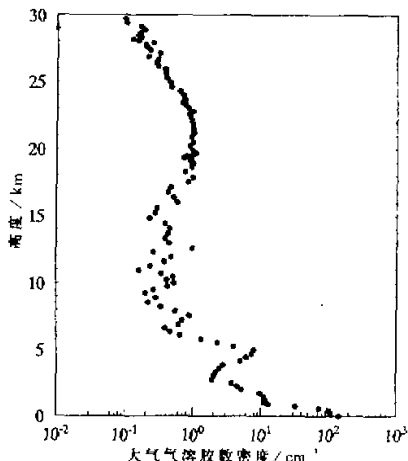


图 4 气溶胶数密度的高度分布

光散射粒子计数器所测得的半径 $r > 0.198 \mu\text{m}$ 的气溶胶数密度的高度分布表示在图 4 中。由图可以看到, 气溶胶数密度的垂直分布的一个明显特点是存在三个极大值区。第一个是近地面层, 数密度达到 143 个/cm³, 显然这与地面扬尘和人类活动有关。第二个极大值区位于 5 km, 其值为 8 个/cm³。在该地区 1983, 1984, 1985, 1986 年同一季节的气球探测中, 也出现过类似极值, 在其他季节、其他大陆地区也有类似的现象^[8,9], 其原因至今不甚明了。这是否属于观测地区的气溶胶空间分布特征, 或是气象因素的影响, 有待进一步的观测研究。第三个极大值区是位于 21 km 左右, 最大数密度为 1.1 个/cm³ 的平流层气溶胶层, 这就是人们所熟悉的 Junge 层。

图 5 给出了气溶胶数密度谱随高度的分布。图 5a 是对流层 0.5 (○), 6.0 (Δ) 和 11.0 km (□) 高度上的谱分布, ○、Δ 和 □ 的值分别是以上述高度为中心 1 km 高度范围内测量值之平均, 虚线是拟合的 Junge 谱; 图 5b 是平流层 20 (○) 和 25 km (Δ) 高度上的谱分布, ○和 Δ 点分别为所示高度 2 km 内的测量平均值, 实线则是拟合的 Junge 谱。由图可以看出, 对流层气溶胶数密度随高度明显减少, 尤其在对流层上部的 11 km 处, 气溶胶中的大小粒子都大量减少。从谱分布来说, 平流层气溶胶的谱分布与 Junge 谱相吻合, 对流层气溶胶的谱分布复杂些, 在 1 μm 附近有一个次峰。显然, 这些特征

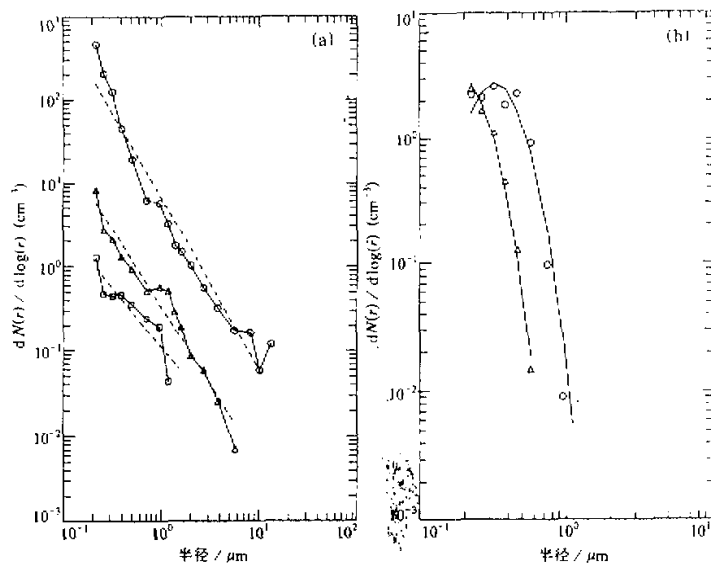


图5 气溶胶数密度谱随高度的分布

(a) 对流层; (b) 平流层

与大气中的物理和化学过程有关。

下面, 将这次测得的大气气溶胶粒子数密度与 1984 年 8 月 23 日在同一地区的观测结果进行比较。图 6 给出了同一地区半径大于 $0.25 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子数密度垂直分布。从图中的两条廓线可以看出, 首先是它们共同存在三个极大值区。不过, 1993 年与 1984 年相比, 对流层中的极值区所处高度较低, 厚度较薄, 但气溶胶粒子浓度则大得多, 大约是 1984 年的 5 倍 ($5.8 \text{ 个}/\text{cm}^3$: $1.1 \text{ 个}/\text{cm}^3$)。而近地面层的浓度极值, 1993 年比 1984 年大得更多, 高达一个数量级以上 ($48.6 \text{ 个}/\text{cm}^3$: $4.8 \text{ 个}/\text{cm}^3$)。造成这种增加的一个很可能的原因是, 近十年来河北省香河地区工业和社会发展所带来的气溶胶粒子污染的增加。

这里更值得注意的是, 1993 年观测所得到的平流层气溶胶浓度明显大于 1984 年。最大数密度之比为 $0.84 \text{ 个}/\text{cm}^3$: $0.57 \text{ 个}/\text{cm}^3$ 。平流层气溶胶是相对比较稳定的, 它主要受火山爆发喷发物的影响。1991 年

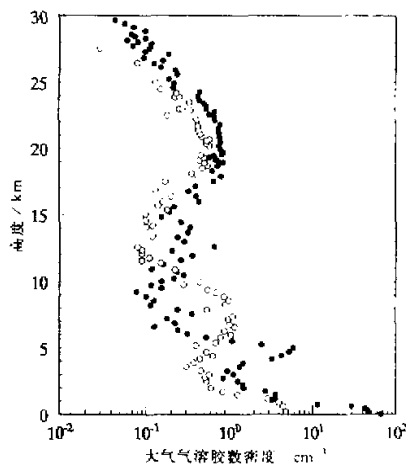


图6 1993 年与 1984 年气溶胶数密度观测结果的比较

●: 1993 年; ○: 1984 年

6月, 菲律宾皮纳图博 (Pinatubo) 火山 (15.1°N , 120.4°E) 喷发, 在平流层产生了约 $30 \times 10^{12} \text{ g}$ 的新气溶胶, 大致是平流层背景气溶胶的 60 倍^[1], 形成了自 1883 年以来全球最大的一次火山爆发。直到 1993 年初, 平流层中残留的该次火山喷发的气溶胶仍然高达 $13 \times 10^{12} \text{ g}$, 大致等于 1982 年 4 月艾尔·奇琼 (El Chichon, 17°N , 93°W) 火山的喷发量。因此, 虽然 1993 年和 1984 年的两次观测均在火山喷发后的二年多, 但由于皮纳图博火山所喷发的气溶胶总量比艾尔·奇琼火山大得多, 所以, 1993 年平流层气溶胶浓度普遍大于 1984 年是一种相当合理的结果。它说明, 直到 1993 年 9 月, 皮纳图博火山喷发的影响仍然残留在中纬度平流层中。

致谢: 在气球发放过程中, 得到了高能物理研究所姜鲁华等天体物理实验室有关同志的大力协助, 在此深表谢意。

参 考 文 献

- 1 石广玉, 1991, 大气微量气体的辐射强迫与温室气候效应, 中国科学 B 辑, 第 7 期, 776~784.
- 2 WMO/UNEP, 1993, The Impact on Climate of Ozone Change and Aerosols.
- 3 石广玉、许黎、吕位秀、任丽新、高木增美、岩田晃、森田恭弘、近藤丰, 1986, 0~33 公里大气臭氧和气溶胶垂直分布的气球观测, 科学通报, 第 15 期, 1165~1167.
- 4 Takagi, M., A. Iwata, Y. Morita, Y. Kondo, G-Y. Shi, L. Xu, 1986, Aerosol Distribution up to 33 km over the Suburbs of Beijing, China (40°N) in Summer 1984, Research Letters on Atmospheric Electricity, Vol. 6, 15~20.
- 5 Hu, H. L. et al., 1987, in "Atmospheric Radiation: Progress and Prospects", Science Press, 543~549.
- 6 McClatchey, R. A. et al., 1972, Optical Properties of the Atmosphere (3rd Edition), AFCRL-72-0497.
- 7 U.S. Standard Atmosphere, 1976, NOAA 76-1562, Washington D.C., 1976.
- 8 Dutsch, H.U., 1966, Two years of regular ozone soundings over Boulder, Colorado, NCAR TN-10, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, January.
- 9 高木增美、森田恭弘、石川晴治, 1976, 大气球シンポジウム, 东京大学宇宙航空研究所, 第 38 期.

Balloon Observation of Atmospheric Ozone and Aerosols

Shi Guangyu, Xu Li, Guo Jiandong, Zhang Baowu and Sun Baolai

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

Gong Zhiben, Zhou Jun and Tan Kun

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031)

Y. Iwasaka, M. Hayashi and M. Nagatani

(Solar and Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya 464)

Abstract The vertical distributions of atmospheric ozone and aerosols measured by balloon are given in this paper. The results show: (1) the number density of ozone in the troposphere is lower ($\sim 10^{12} \text{ mol/cm}^3$) with a slight decreasing trend from the surface to the tropopause. Above the tropopause it begins to increase rapidly up to a maximum value of $4.78 \times 10^{12} \text{ mol/cm}^3$ around 24 km. The partial pressure of ozone has a

similar appearance to its number density and a maximum value of 146×10^{-4} Pa appears at about 24 km; (2) there is a sub-maximum of 62×10^{-4} Pa for the tropospheric ozone at 15~16 km; (3) a significant characteristic of the observed profile of aerosols with radius larger than $0.2 \mu\text{m}$ is that there are three maxima located at the ground, 5 km and 20 km, with the number density of about 143, 8 and 1.1 particle $\cdot \text{cm}^{-3}$, respectively; (4) the volume spectra of aerosols appear bi-modal in the troposphere but the pattern disappears in the stratosphere. Comparison with other observations has also described in this paper.

Key words ozone aerosol stratospheric balloon

英文版《从大气环流到全球变化》出版

为庆祝叶笃正先生 80 华诞, 气象出版社于 1996 年 2 月出版了英文版《从大气环流到全球变化》(*From Atmospheric Circulation to Global Change*)。中国科学院院长周光召为该书写了前言, 中国气象学会理事长、中国气象局局长邹竞蒙撰写了祝贺文章。该书由两部分组成, 第一部分精选了叶笃正先生 1949~1993 年的代表性著作 11 篇, 读者可以从中系统地了解和学习叶笃正先生在大气能量频散、东亚大气环流、青藏高原动力学等领域的卓越贡献; 第二部分是国内外的气象学家为庆祝叶先生 80 华诞专门撰写的研究论文, 共 39 篇。按内容大致可分为大气中的能量频散, 大气运动的地转适应、大气环流、青藏高原对气候和天气的影响、气候与环境, 几乎覆盖了大气科学的各个领域。为该书撰写论文的国外知名学者有 H. L. Kuo, L. Bengtsson, Makin Mak, Lau Ngai Cheung, T. Delworth, S. Manabe, C. W. Newton, Wang Bin, S. Yamada, 国内知名学者有曾庆存、周秀骥、黄荣辉、丑纪范、巢纪平等。

为出版该书, 中国科学院大气物理研究所成立了以陶诗言院士为顾问、洪鍾祥所长为主任的编委会, 对论文严格挑选, 使该书具有作者层次高、科研水平高的特点, 基本反映了当前大气科学的最新进展。

责任编辑郭彩丽、黄元燕认真细致、夜以继日的工作, 气象出版社第四编辑室的通力配合, 使该书得以在叶笃正先生 80 华诞庆祝活动之前出版。英文版《从大气环流到全球变化》不仅是献给叶笃正先生的一份珍贵礼品, 也是献给气象科技界的一部有价值的学术著作。该书对气象科研工作者以及大专院校的师生了解当前大气科学的前沿课题, 指导科学研究和业务建设, 提高科技英文的阅读水平, 进行国际交流与合作, 都十分有益。

英文版《从大气环流到全球变化》全书近 800 页, 布面精装, 每本定价 200 元。中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室尚有少量存书, 有需要者可以与该实验室程新金联系, 邮政编码 100080, 电话 62571939。

(程新金)