

臭氧垂直分布个例观测中次峰现象的诊断分析*

郑向东^{1**} 李维亮¹ 周秀骥¹ 汤洁¹ 秦瑜²

1. 中国气象科学研究院,北京 100081; 2. 北京大学地球物理系,北京 100871

摘要 根据臭氧探空观测数据,结合气象和卫星观测资料,对 1999 年 8 月 2 日北京地区 10~18 km 高度范围出现的臭氧次峰进行分析. 研究表明:臭氧次峰的出现与切断低压这一天气过程有密切联系,并伴有显著的高空急流. 用国家气象中心高分辨率同化预报系统(HLAFS)再分析网格点数据对臭氧次峰的动力过程进行了诊断分析,结果说明非地转平流输送和对流层顶折叠是对流层臭氧次峰形成的重要原因.

关键词 臭氧次峰 诊断分析 平流层-对流层的交换

在平流层 20~25 km 高度范围,臭氧浓度有一稳定的最大值区,这是臭氧的主峰区. 但很多观测都注意到臭氧垂直分布除平流层稳定的主峰之外,有时会出现一些明显的次峰分布. 这种次峰分布也称为臭氧垂直分布中的分层现象^[1],主要出现在平流层下层和对流层中、上层. 近几年对臭氧次峰的研究都强调了动力输送机制,认为平流层与对流层之间的交换(STE)起了重要作用^[2,3]. STE 的输送是如何促使臭氧次峰形成的呢? 这仍是需要观测和研究的课题. 尽管受条件限制,臭氧垂直分布观测在我国还未达到业务化水平,但与课题相结合的一些臭氧探空观测实验已初步给出我国不同地区臭氧垂直分布的特征^[4,5],这为研究我国上空 STE 过程提供了重要的资料.

本文根据 1999 年 8 月 2 日和 6 日在北京市气象局南郊观象台(116.47°E,39.81°N,ASL:31 m)进行的两次臭氧探空观测结果,利用有关气象和卫星资料,对 8 月 2 日出现在对流层中、上部多个臭氧次峰现象的动力机制进行了分析. 得出的结果将有助于我们认识 STE 对我国地区臭氧垂直分布的影响.

1 观测

实验中用电化学(ECC)6A 型臭氧探空仪观测臭氧垂直分布,用芬兰 Vaisala GPS 电子探空仪观测气象要素. 有关臭氧探空仪的工作原理及测量误差的分析可参阅文献[6]. 观测前对探空仪的背景电流和抽气泵的流量进行了标定和检测,结果都在正常值范围之内.

2000-12-25 收稿,2001-06-04 收修修改稿

* 国家自然科学基金(批准号:49975026)和中国气象科学研究院跨世纪青年基金资助项目

** E-mail: tangj@cma.gov.cn

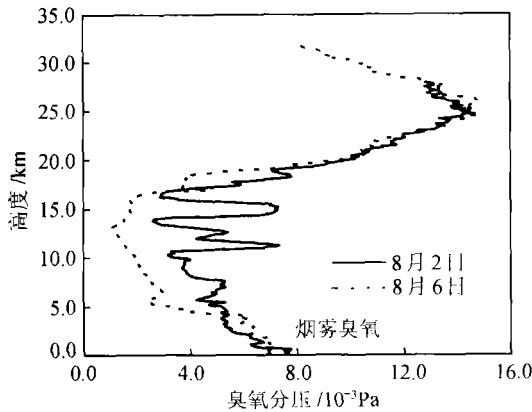


图 1 1999 年 8 月 2 日与 6 日北京地区臭氧垂直分布

2 探测结果分析

2.1 臭氧、气象探空风场的观测结果

图 1 是 1999 年 8 月 2 日和 6 日探空观测的臭氧垂直分布. 由图可见: 臭氧分布变化主要发生在 5 ~ 18 km 高度, 18 km 以上臭氧浓度变化很小. 8 月 2 日有两个明显的臭氧峰, 它们的峰值中心分别在 11 和 15 km 附近, 而 8 月 6 日 4 ~ 17 km 间, 臭氧没有明显的次峰. 两次观测中, 4 km 以下 (包括近地面层在内) 的臭氧分压值很高, 1 km 以下近 8.0 mPa, 相当于平流层臭氧主峰分压值的一半, 与 1993 年 9 月石广玉等在北京郊区的观测值相当^[4]. 夏季近地面如此高的臭氧是典型

的光化学污染结果, 也被称为烟雾臭氧.

图 2 给出的是 8 月 2 日和 6 日风场的垂直分布变化. 从风速来看, 8 月 2 日在 11 ~ 14 km 高度范围出现了中心位置在 12 km 左右的急流, 最大风速约为 32 m/s. 在 4 ~ 17 km 范围内, 风速都超过 8 月 6 日. 此外, 8 月 2 日在 10 ~ 13 及 14 ~ 16 km 的臭氧次峰和风速峰值高度位置基本接近. 在 12 km 以下 8 月 2 日为 W-N 扇区的风, 而 8 月 6 日则为 S-W 扇区的风. 风场观测结果初步说明了臭氧次峰的出现与来自西北方向的气流有关, 而低臭氧分布 (8 月 6 日) 则与西南气流有关.

2.2 天气过程

在前后 4 d 内臭氧和风场的垂直分布发生了较大的变化, 反映了不同类型的天气过程. 8 月 2 日观象台地面气压为 1002.5 hPa, 而在 8 月 6 日则是 998.7 hPa, 这正是两个不同的天气系统. 图 3 是根据我国 41 个常规气象探空站观测, 绘出的 8 月 2 日北京地区附近 500 hPa 高度场的分布.

8 月 2 日 00 时在 500 hPa 等压面上, 内蒙上空东移的高压将南下的低压系统切断, 使得北京及周围地区上空为一孤立的低压系统, 即切断低压. 在 200 hPa 等压面上低压形势仍十分明显 (图略), 北京地区高空基本被低压系统所控制. 根据 8 月 1 日 12 时和 8 月 2 日 12 时的常规气象探空资料的分析, 切断低压系统持续时间没有超过 24 h.

切断低压的快速演变可能与低压区内存在强烈的下沉气流有关, 因为切断低压是对流层中部和上部的冷性气旋, 强烈的下沉气流很快使其失去冷性结构而难以维持很长时间^[7].

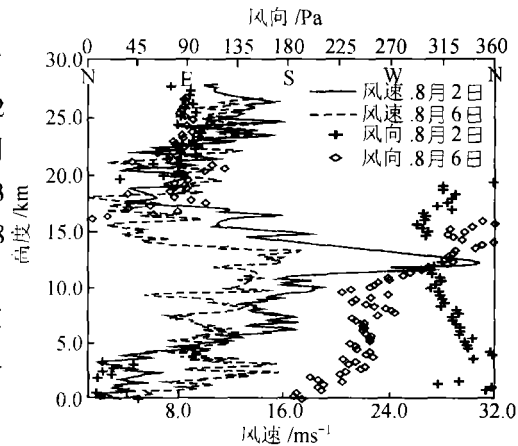


图 2 1999 年 8 月 2 日与 6 日北京地区风场垂直分布

2.3 臭氧总量和垂直分布的变化

臭氧次峰的发生和消失造成了臭氧垂直柱总量的差异, 这会在携带臭氧总量绘图光谱仪(TOMS)的卫星观测中反映出来¹⁾. 从表 1 的北京地区 1999 年 7 月 30~8 月 6 日 TOMS 臭氧总量变化可以看出: 8 月 2 日臭氧总量最高. 而从表 2 臭氧探空观测数据积分结果来看, 在 600~100 hPa 高度范围内臭氧次峰的出现和消失是臭氧总量变化的主要因子, 600 hPa 以下包括近地面的臭氧峰值却很稳定, 受高空天气过程的影响相对小.

从卫星观测臭氧总量的区域分布可以看出, 北京及其周边地区 8 月 1~3 日是一个臭氧高值区的增加过程. 8 月 2 日臭氧高值区主要分布在 130~135°E, 40~45°N, 总量达 340 DU(图 4), 而在北京的东北面 120~125°E 附近臭氧总量的梯度变化比较大, 这反映了高空急流区的存在^[3], 并已在探空观测资料中得到证实(图 2).

表 1 北京地区上空的 TOMS 臭氧总量逐日变化

日期	07-30	07-31	08-01	08-02	08-03	08-04	08-05	08-06
总量/DU	290	302	315	333	323	317	292	288

表 2 8 月 2 日和 6 日各个高度范围内的臭氧总量的垂直分布

单位: DU

日期	高度范围			整层臭氧总量
	地面~600 hPa	600~100 hPa	100~70 hPa	
8 月 2 日	24.89	66.62	17.17	331.84
8 月 6 日	26.10	29.43	11.74	291.41

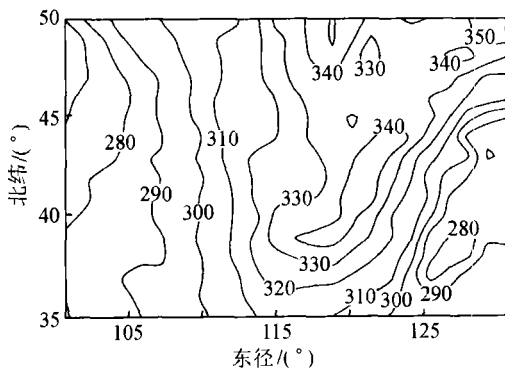


图 4 1999 年 8 月 2 日北京及其周边地区 TOMS 卫星臭氧总量(DU)的分布

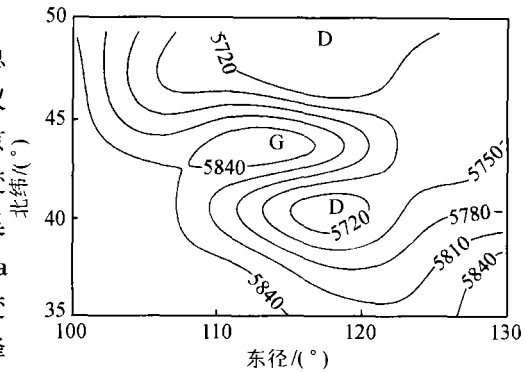


图 3 常规气象探空资料分析, 500 hPa 等压面上高度场(位势米)分布
D 低压, G 高压

2.4 垂直剖面分析

观测表明高空急流存在是臭氧次峰出现时的一个特征. 高空急流与急流横截面上的非地转输送是有密切联系^[8]. 非地转输送可以用非地转风来表示. 非地转风使得气流穿越等高线, 从而改变大气成分分布.

为了分析非地转风的输送过程, 我们根据 8 月 2 日 00 时 500 hPa 等压面上高度场的分布(图 3), 从点(112°E, 35°N)到点(125°E, 48°N)连线进行横截剖面的分析. 该剖面穿过北京及其附近地区的高度场, 并且基本上与 200 hPa 等压面上的风矢量相垂直(图略). 图 5 中横坐标为剖面所经

1) 通过 <http://jwocky.gsfc.nasa.gov> 获取详细资料

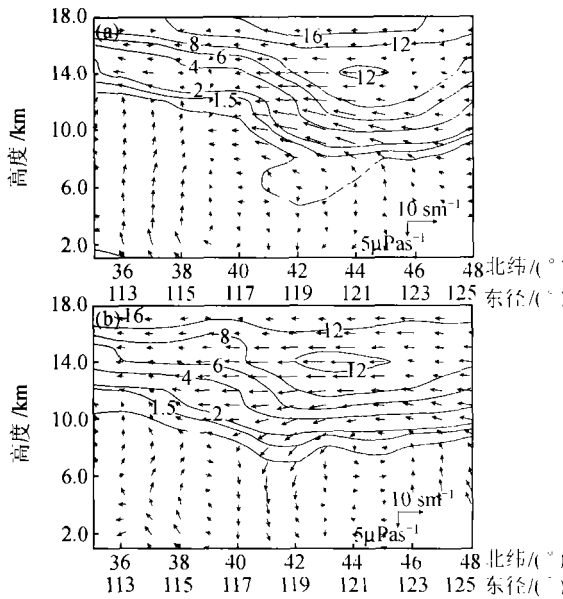


图 5 垂直剖面分析
矢量为非地转风的分布,实线为位势涡度的分布;(a)8月1日12时;(b)8月2日00时

过的地理位置. 用 HLAFS 格点数据进行分析; 数据的水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$. 垂直分辨率为标准等压面 13 层(1000 ~ 50 hPa), 我们通过内插处理使得 70 hPa 以下增加到 20 层, 平均的垂直分辨率为 1 km; 用非地转风切向分量和垂直速度 ω 两个矢量的合成表示横截剖面上流场的垂直分布^[9]; 用位势涡度(PV)来表征对流层顶的变化^[10].

图 5 给出了 8 月 2 日 12 时 ~ 8 月 2 日 00 时这两个时次上述两点连线的剖面的流场分布变化, 两个时次离观测时间都比较近. 虽然 8 月 1 日 12 时北京及周围地区上空以上升气流为主, 但是在 10 km 以上的高空, 有明显的自东北向西南方向的非地转平流输送(图 5 (a)). 该过程在 8 月 2 日 00 时 10 ~ 15 km 高度得到明显加强, 并向西南方向推移(图 5 (b)). 8 月 2 日 00 时 40 ~ 43°N, 2 ~ 10 km 左右高度上出现了明显的下沉气流, 北京处在这个下沉区的边缘. 8 月 2 日观测到的臭氧次峰

与非地转平流输送的加强是密切联系的.

随着自东北向西南方向的平流输送的加强, 对流层顶分布也会发生相应的变化. 8 月 1 日 12 时有一 1.0 PV 单位(1 PV 单位 = $10^{-6} \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-2}$)舌从 8 ~ 9 km 高度沿东北向西南向对流层伸出, 其前端已伸到 41°N, 118°E 地区上空的 5 km 高度(图 5(a)). 如果我们以 1.5 PV 单位所对应的高度来定义对流层顶的高度^[10], 这时北京上空的对流层顶在 12.5 km 左右. 8 月 2 日 00 时, PV 舌已消失, 在 7 ~ 8 km 留有一些痕迹, 对流层顶已下降到 9 km 左右. 在 41 ~ 43°N 地区的对流层顶最低, 只有 8 km 左右(图 5 (b)). PV 舌的出现表明了在北京东北地区上空发生了对流层顶折叠; 平流层臭氧被输送到对流层. 富臭氧气团进入对流层中、上层, 改变了臭氧垂直结构和总量分布.

2.5 北京上空臭氧次峰与 PV 的垂直分布

分别用 HLAFS 资料和气象探空数据所计算的静力稳定度可确定 8 月 2 日北京地区 PV 的垂直分布变化(图 6). 全部 HLAFS 数据计算的 PV 在 8 ~ 14 km 有一明显的增加过程, 5 km 以下的 PV 变化不明显. 部分采用 HLAFS 数据计算的 PV 则与臭氧垂直分布的变化有很好的一致性.

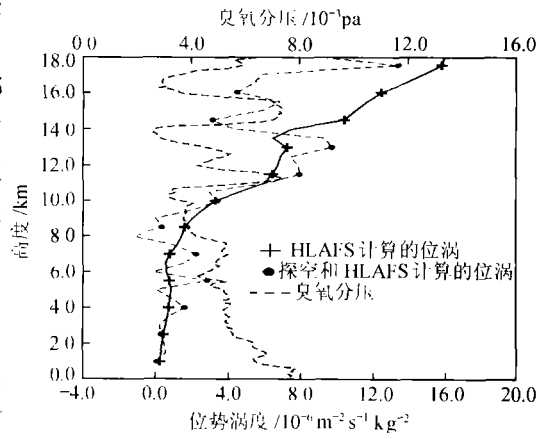


图 6 1999 年 8 月 2 日北京地区臭氧与位势涡度的垂直分布

这充分地说明了促使臭氧次峰出现的输送过程可近似地为绝热过程. 这个输送过程中, 由于强烈的下沉气流, 切断低压很快失去冷性结构, 富臭氧气团从平流层向下输送的过程中没能与周围空气进行充分混合, 因而这些气团在短时间内保持着平流层气团的高 PV、高臭氧物理化学特征.

3 结论

通过分析, 我们确认 1999 年 8 月 2 日北京观测到的对流层中层以上臭氧垂直分布的次峰现象是由切断低压这一天气过程所引起的, 而在 600 hPa 以下(包括近地面层)的臭氧峰值分布变化受高空天气过程的影响小. 高空臭氧次峰所处的高度位置与气象要素的垂直分布变化是密切联系的. 高空急流的出现以及在急流横截面上的非地转平流输送和对流层顶折叠是臭氧次峰出现的动力机制; 平流层富臭氧气团向下输送是对流层中、上层臭氧次峰的来源.

致谢 臭氧探空观测工作得到中国气象局监测网络司大中型自动化项目的前期实验课题的支持; 美国航空航天局公开提供 TOMS 卫星臭氧观测数据.

参 考 文 献

- 1 Reid S J, et al. Lamination in ozone profiles in the lower stratosphere. *Q J R Meteorol Soc*, 1991, 117: 825
- 2 Baray J L, et al. Tropical cycle Marlene and stratosphere-troposphere exchange. *J Geophys Res*, 1999, 104(D4): 13953
- 3 Gouget H, et al. Ozone peaks associated a subtropical tropopause fold and with the trade wind inversion: A case study from the airborne campaign TROPOZ II over the Caribbean in winter. *J Geophys Res*, 1996, 101(D4): 25979
- 4 石广玉, 等. 大气臭氧与气溶胶的高空气球观测. *大气科学*, 1996, 20(4): 401
- 5 Liu Qijun, et al. Ozone vertical profile characteristics over Qinghai Plateau measured by electrochemical concentration cell ozonesondes. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, 14: 481
- 6 Reid S J, et al. Accuracy of ozonesonde measurements in troposphere. *J of Atmos Chem*, 1996, 25: 215
- 7 顾钧禧(主编). *大气科学辞典*. 北京: 气象出版社, 1994
- 8 Keyser, et al. A review of the structure and dynamics of upper-level frontal zones. *Mon Weather Rev*, 1986, 114: 452
- 9 Jean P, et al. Analysis and diagnosis of the composition of ageostrophic circulations in jet-front systems. *Mon Weather Rev*, 1989, 117: 2447
- 10 World Meteorological Organization, Atmospheric ozone 1985: Assessment of our understanding of the processes controlling its present distribution and change, WMO Global Ozone Res. and Monit. Proj, Rep 16, Geneva, Switzerland, 1986, 1~3