

# 一次对流层异常臭氧次峰的观测研究及其动力输送过程的分析\*

郑向东 周秀骥

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

秦 瑜

(北京大学物理学院, 北京, 100871)

汤 洁 李维亮

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

## 摘 要

文中分析了 1996 年 8 月 1 日发生在西宁(36. 43° N, 101. 45° E, 海拔: 2296 m) 地区对流层异常臭氧次峰现象。观测资料揭示了高空低压槽东移是臭氧次峰的主要天气特征。三维后向轨迹计算表明, 尽管代表臭氧次峰的气团可以追溯到中亚地区, 但是明显的气团向下输送则发生在新疆、青海间的高空低压槽内。中尺度模拟进一步确认了对流层顶折叠和平流层向下输送是臭氧次峰出现的动力机制。臭氧次峰在对流层高度位置与准无辐散层有关。  
关键词: 臭氧次峰, 后向轨迹, 对流层顶折叠, 平流层向下输送。

## 1 引 言

对流层臭氧次峰现象与平流层向下输送是密切联系的。受高空天气过程的影响, 中纬度地区对流层顶折叠可引起大量臭氧从平流层输送到对流层, 这已被大量观测实验所证实<sup>[1, 2]</sup>。近些年来, 的观测研究发现在低纬地区也存在着类似的平流层向下输送过程<sup>[3]</sup>。进一步的研究工作是则以位势涡度(PV)作为臭氧垂直分布变化的示踪物, 通过中尺度模式模拟平流层臭氧向下输送的过程。目前可以确认这是平流层/对流层间相互交换的一个重要环节<sup>[4, 5]</sup>。

中国从 20 世纪 80 年代先后在北京、西宁、拉萨等地开展了一些科研性的臭氧探空观测<sup>[6~ 8]</sup>, 但系统业务性的工作至今还没有。次数有限的观测为研究中国不同地区臭氧垂直分布的状况和短期的变化特征提供了资料。本文便以 1996 年夏天在西宁臭氧探空观测资料为基础, 从天气动力学角度分析该年 8 月 1 日在 7 km 附近出现一次对流层异常臭氧次峰的机制。有关 1996 年夏季西宁对流层臭氧垂

直分布与气象要素的之间的关系已另文给出<sup>[9]</sup>。本文用卫星观测、常规气象探空资料分析了天气特点; 用三维后向轨迹和中尺度模式研究了平流层向对流层输送及其对臭氧垂直分布的影响。

## 2 观测分析

### 2.1 对流层臭氧异常分布及背景气象要素的观测结果

图 1a 是 1996 年 7 月 31 日到 8 月 2 日西宁臭氧垂直分布的变化。8 月 1 日 7 km 高度异常臭氧峰值区最为显著, 其分压(单位: 1 mPa =  $10^{-3}$  Pa)都超过了 7 月 31 日以及 8 月 2 日的两倍多; 在 4 km 附近臭氧也有明显的次峰; 7~ 12.5 km 的臭氧分压均高于 31 日和 2 日, 但 12.5 km 以上包括对流层上部和平流层下部臭氧分布比较稳定。8 月 1 日这样的臭氧垂直分布在 1996 年 7 月 5 日~ 8 月 3 日总共 29 次观测中是唯一的现象, 它在西宁上空持续时间没有超过 24 h。

图 1b~ d 分别给出了 16 km 以下同步的气象观测结果。1 日 6~ 7 km 和 3~ 4 km 有明显的逆温结

\* 初稿时间: 2001 年 9 月 13 日; 修改稿时间: 2002 年 5 月 25 日。

资助课题: 国家自然科学基金资助(项目批准号 49975026)和中国气象科学研究院博士启动基金。

构(图 1b); 暗示了臭氧次峰与大气的稳定层有关联。由水汽分布可以看出, 1 日 4 km 以上比湿低于 31 日(图 1c), 符合低水汽和高臭氧的平流层气团特征。2 日尽管也存在着很低的水汽, 可臭氧分压也低(图 1a), 这与其它的观测<sup>[10, 11]</sup>所得出水汽与臭氧反相关关系是不一致的。在自由大气中, 虽然臭氧

与水汽的光解反应是两者之间反相关的一个机制, 但从 2 日观测可以推测: 动力输送而不是化学过程在这臭氧垂直分布连续的变化中起主导性的作用。此外, 1 日臭氧次峰附近的风速比 31 日要大(图 1d), 10 km 附近是较强的西风, 而在 12~14 km 的高度范围, 7 月 31 日的风速要高于 8 月 1 日。

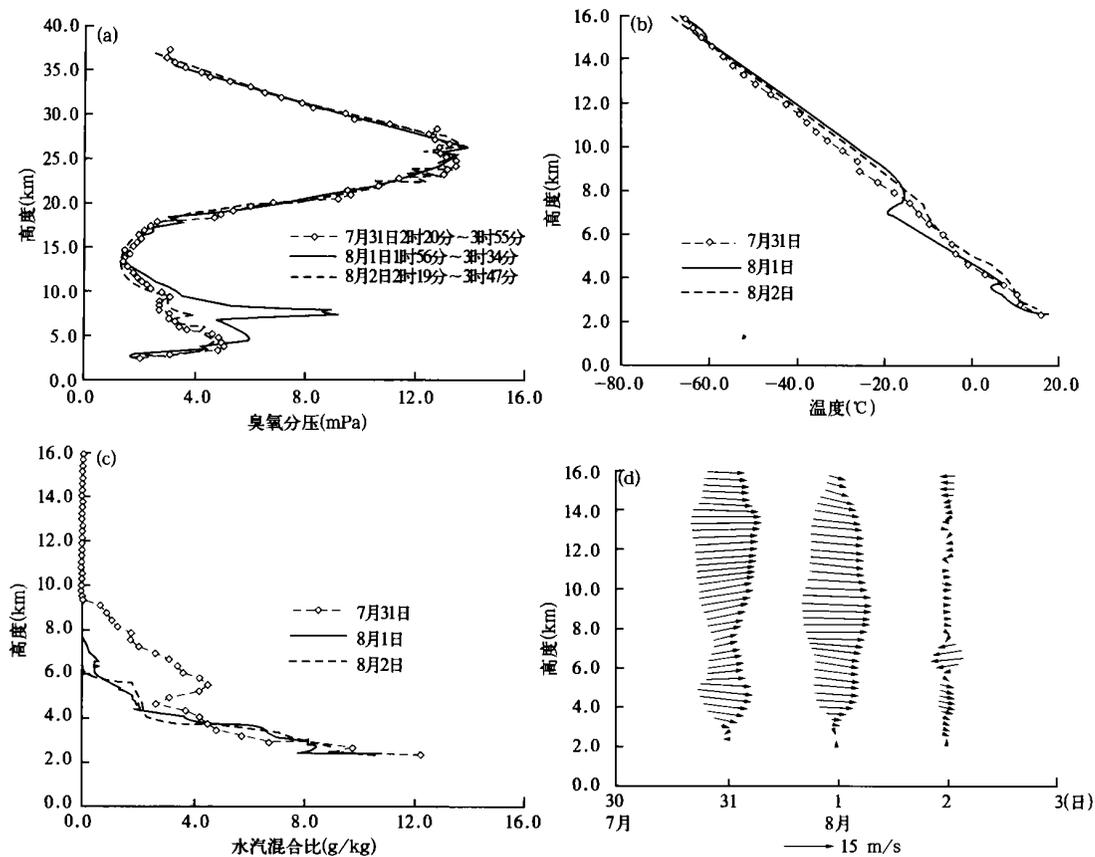


图 1 西宁地区 1996 年 8 月 1 日臭氧以及相应的气象资料垂直分布  
(a. 臭氧, b. 温度, c. 水汽, d. 风矢量)

## 2.2 卫星和台站气象探空观测结果

图 2a 是 8 月 1 日上午 10 时 34 分 GMS 卫星水汽分布。在中国西北部地区则有一高空冷锋云系跨越西宁(靠近青海湖东边)上空, 在 400~300 hPa 高度范围(卫星观测的敏感高度)内的水汽非常低(对应黑颜色), 水汽分布与图 1b 的低水汽比较符合。黑颜色区为一典型的斧形分布, 有明显的下沉运动。欧洲空间中心 GOME 卫星臭氧总量观测了 8 月 1 日西宁及其附近地区上空臭氧总量分布的特点(图 2b)。西宁地区的臭氧总量在 300~305 DU<sup>①</sup>之间,

臭氧总量梯度值(随纬度变化的梯度值)达到了 5 DU/纬度。臭氧总量随纬度变化大说明了平流层厚度变化也大, 这也意味着西宁地区的对流层顶有较大的变化, 存在着对流层顶降低现象, 这与高空下沉运动有联系的。

从常规探空资料可以发现: 7 月 31 日 00 时(UCT, 下同)新疆与青海间有一高空低压槽向东移动, 31 日 12 时和 8 月 1 日 00 时西宁受该高空低压槽的控制, 1 日 12 时低压槽已消失。图 3 是 8 月 1 日 00 时探空台站揭示的 300 hPa 等压面上的风矢

① DU 臭氧柱总量的单位:  $\text{DU} = 10^{-3} \text{cm}$  (在标准大气下)

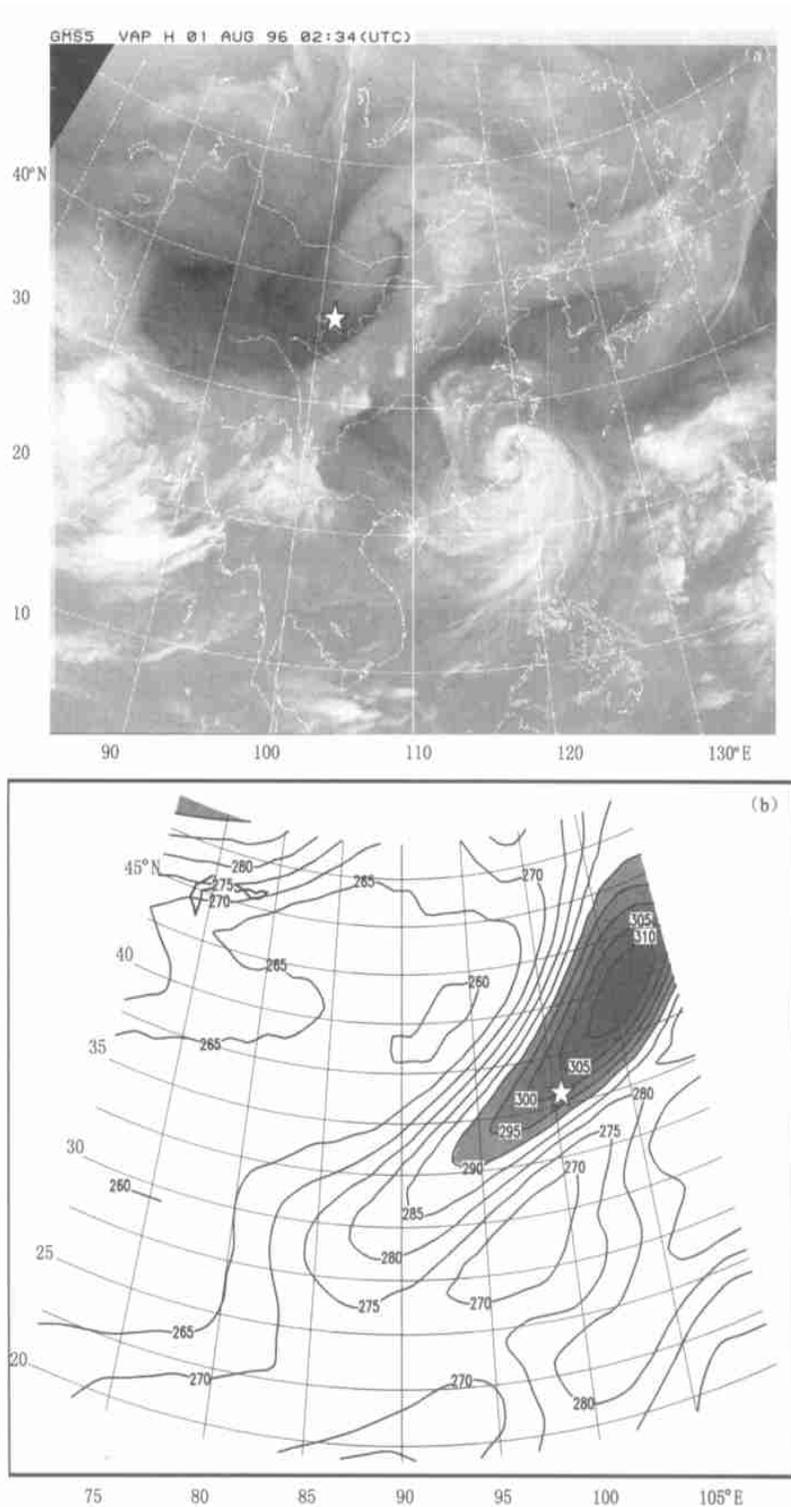


图 2 卫星资料的观测结果

(a. GMS 卫星水汽云图, b. GOME 卫星的臭氧总量分布图, ☆表示西宁的地理位置)

量的分布变化。西宁地区明显的低压槽系统与 2 个多小时以后 GMS 卫星观测结果是基本一致的(图 2a)。NW 方向是该地的主导风向, 相对较弱的 SW 气流基本上出现在西宁以南地区。

### 3 三维后向轨迹分析

观测资料已给出了臭氧次峰出现时的天气特征。本节用 NCEP 网格点数据, 通过三维后向轨迹

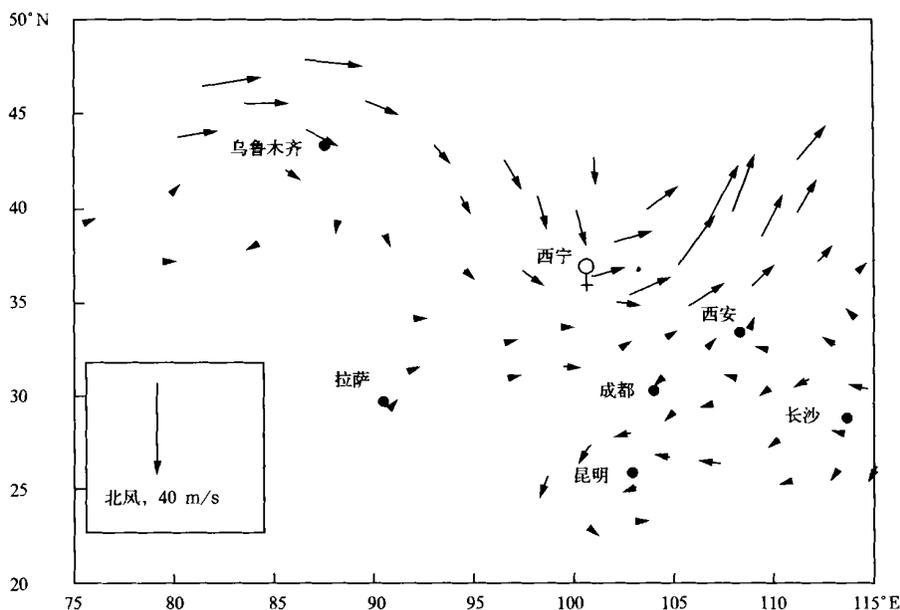


图3 300 hPa等压面上的风矢量分布  
(西宁正处在低压槽位置)

追溯臭氧次峰的起源。在短时间内影响自由大气中臭氧浓度变化的主要因素是动力输送,而化学贡献比较小<sup>[11,12]</sup>。这样,对流层某个有限空间范围内臭氧可以被认为是由分离、封闭孤立、生命时间较长而浓度比较均一的小气团组成,轨迹模式便计算这些小气团的输送路径,分析臭氧次峰的起源。

本文轨迹计算是以 NCEP 数据为气象场资料,反推 72 h 内 1331(11×11×11) 个气团运行的平均轨迹<sup>[13,14]</sup>;这些气团起始位置限制在某一个有限的空间。就本文而言,气团的起始时间是 1996 年 8 月 1 日 00 时(UCT),起始位置是西宁,高度范围分别是 580±5.0 hPa(轨迹 1)、407±5.0 hPa(轨迹 2)、300 hPa±2.0(轨迹 3),分别对应图 1 中的 4、4、7 和 9 km,均代表了不同高度的臭氧分布特征。

从轨迹水平分布来看(图 4a),三条轨迹均来自于西宁西北纬度较高的地区。第 1 条轨迹跨越空间距离不是很大,大部分输送路径在中国境内。第 2、3 条轨迹在 7 月 29 日(虚线表示)则是沿纬向输送,其中代表臭氧异常次峰的第 2 条轨迹分布在 50~55°N,65~85°E 之间;第 3 条轨迹则是在中亚地区 40°N 附近。7 月 29 和 30 日轨迹跨越的距离都比较大。7 月 31 日~8 月 1 日 00 时三条轨迹都由新疆、青海之间沿东南方向进入西宁上空。

图 4b 是 3 条轨迹垂直分布随时间的变化。轨迹 1(结束前 24 h)、轨迹 2(结束前 4 h)和轨迹 3(结

束前 72 h)都呈下沉趋势。尤其是 7 月 30~31 日在新疆与青海之间高空有比较强的下沉运动,这和高空低压槽天气特征是一致的。从 NCEP 数据资料所提供的北半球高度场来看,7 月 29 日和 30 日轨迹 2、3 所经过的区域没有明显可引起对流层顶折叠的低压槽系统,相反,在第 2 条轨迹所经过的区域有一个高压脊(图略)。可见,8 月 1 日对流层臭氧普遍增加主要与 7 月 31 日到 8 月 1 日新疆与青海之间气团下沉运动相联系,在这里发生了由高空向低空的输送过程。

#### 4 中尺度过程的模拟结果

轨迹计算分析了气团的输送路径,明显下沉运动说明了从下平流层或上对流层向下输送是对流层臭氧异常增加的原因。但轨迹计算受到格点气象数据时间和空间分辨率的制约。对于 NCEP 数据来说,分辨率仅为 2.5°×2.5°,时间的分辨率为 6 h。另外,轨迹计算结果仅代表 1331 个气团的平均分布状况,随着反推时间的增加,气团空间分布的离散性是不得不考虑的因素<sup>[13,14]</sup>。因此,有必要通过中尺度模式来研究本观测个例的动力输送过程。

本文采用 MM5 非静力平衡模式。模式的水平格点数为 56×86,格距为 45 km,中心点在西宁。参考 Ravetta 等<sup>[5]</sup>的经验,模式在 100 hPa 以下为 34 层,平均垂直分辨率接近 0.5 km。初始场采用 NCEP

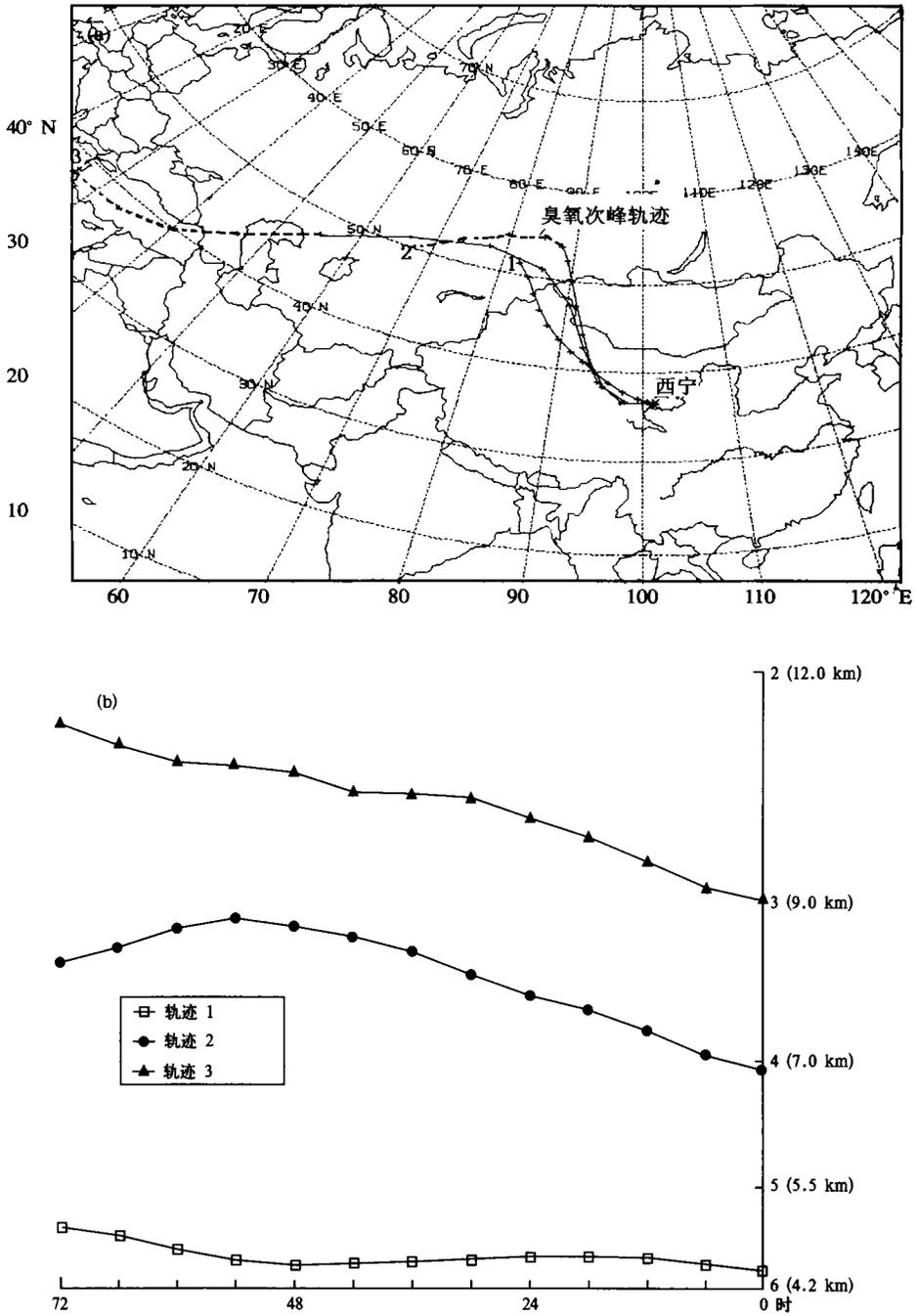


图 4 1996年 8月 1日三维后向轨迹计算结果  
(a. 平均轨迹的水平分布, b. 轨迹的垂直分布)

再分析资料以及中国常规气象探空资料进行预处理。侧边界为时变松弛边界条件, 行星边界为总体边界条件, 水平扩散为四阶水平扩散形式, 降水物理过程采用积云参数化方案。模式从 1996年 7月 31日 00时(UCT)开始积分, 做 36 h 预报。

考虑臭氧异常分布主要接近在 400~ 300 hPa 高度, 文中以 350 hPa 等压面上 PV 作为臭氧分布

变化的示踪物, 分析 31日 00时到 8月 1日 04时 PV 的分布变化(图 5)。从图 5 可以看到: 31日 08时之前, 高 PV 分布始终在西北地区并向西宁上空逼近; 31日 12时 PV 高值已触及西宁地区, 并有 PV 舌向西南方向延伸; PV 呈斧形分布, 与 GMS 卫星水汽运动表征的下沉运动区相似。1日 00时高于 1.2 PV 单位区域范围虽然减少, 但是等值线

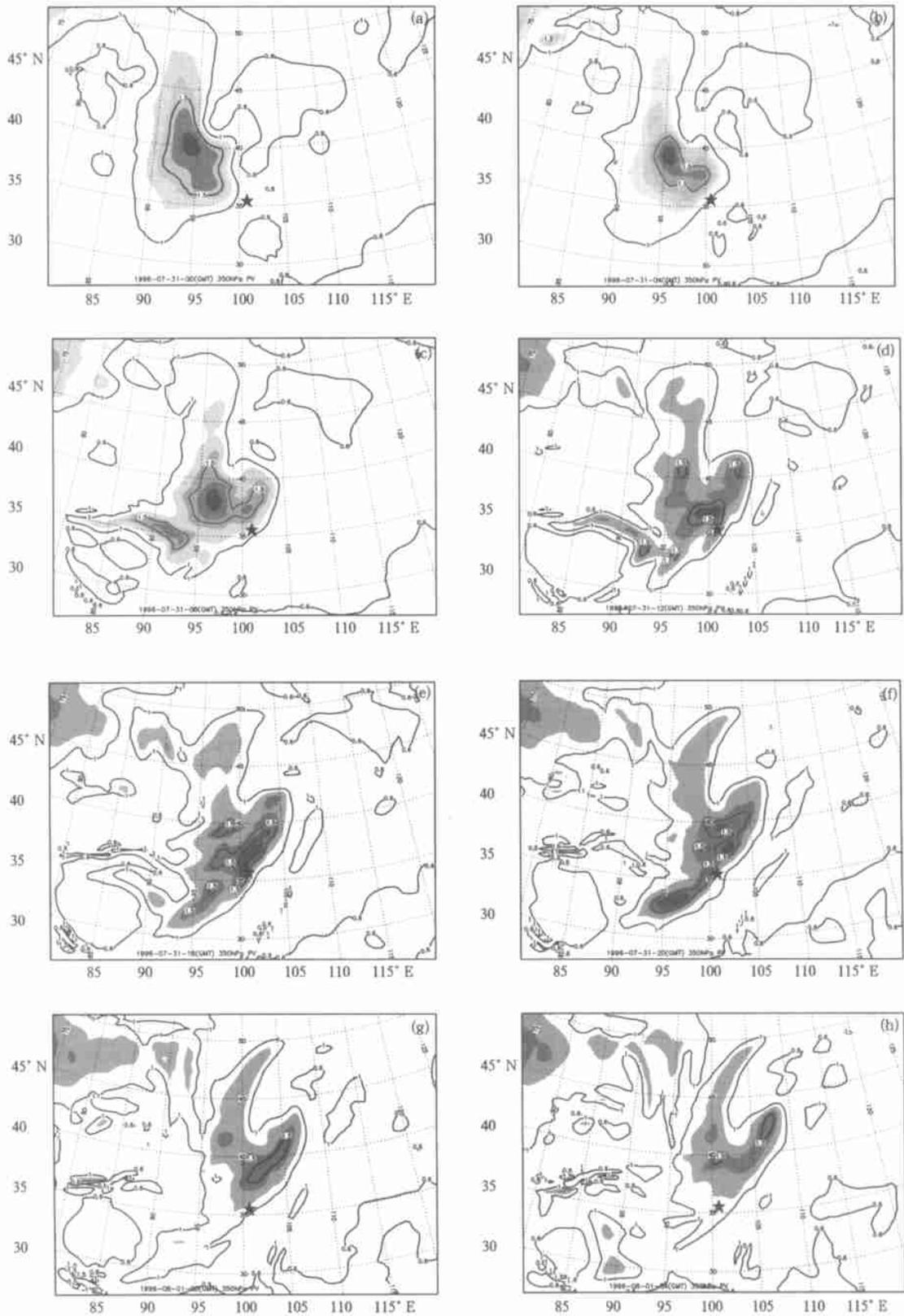


图5 MM5 模拟从 1996 年 7 月 31 日 00 时到 8 月 1 日 04 时每隔 4 h 350 hPa 等面上的位涡分布连续变化 (a~f 分别为 7 月 31 日 00, 04, 08, 12, 16, 20 时; g 和 h 分别为 8 月 1 日 00, 04 时。填色区为 PV 大于 1.2 PV 单位, ☆表示西宁地理)

为 1.0 单位 PV 舌仍向西南延伸, 形成了一个细长的 NE-SW 走向的 PV 舌。1 日 04 时整个 PV 高值区已越过西宁上空并向东北方向推移。31 日 16 时~ 8 月 1 日 00 期间, 350 hPa 的 PV 分布与 GOME 卫星的观测的臭氧总量分布特征类似, 两者的高值区都呈 NE-SW 走向, 说明了模式的 PV 分布还是可以简单地表征臭氧总量分布变化。

以 1.5 PV 单位 ( $1 \text{ PV 单位} = 10^{-6} \text{ m}^{-2} / (\text{s} \cdot \text{kg}^2)$ ) 作为动力学对流层顶的高度位置<sup>[15]</sup>, 可以看出对流层顶折叠区的变化是随着高空低压槽的变化

而变化的, 也是一个自西向东发展过程。在西宁上空出现的对流层顶折叠区是在 31 日 12~ 20 时左右。在 16~ 20 时, 一条细长呈 NE-SW 走向 PV 等值线的分布, 是一个很典型对流层顶折叠区分布。对流层顶折叠区在 8 月 1 日 00 时已移向西宁东北边, 在 04 时则进一步减小。

图 6 是根据 MM5 模拟结果给出的 31 日 03 时 (图 6a) 和 1 日 03 时 (图 6b) 沿西宁纬度 ( $36.45^\circ \text{N}$ ) 所做的经向垂直剖面 PV 分布, 这两个时次均接近气球在对流层的飞行时间。从图可以看出, 1 日

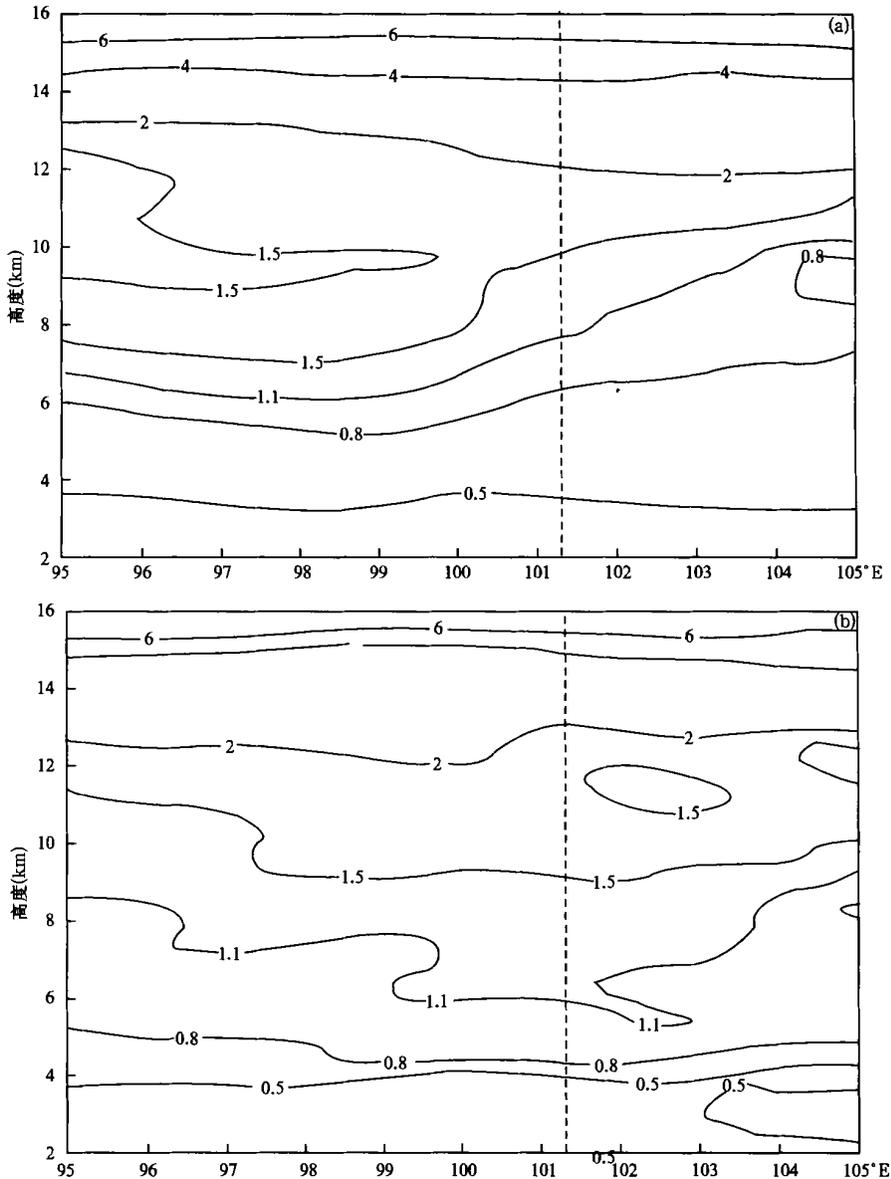


图 6 MM5 模拟的 7 月 31 日 03 时 (a) 和 8 月 1 日 03 时 (b) 沿  $36.43^\circ \text{N}$  的经向剖面的位势涡度的分布  
(图中虚线部分代表了西宁地区)

03 时 5~10 km 范围 1.1 和 1.5 PV 等值线经过的高度要低于 31 日 03 时, 而且在 99~103°E 之间有一明显的 PV 舌, 该舌已向下伸到 5 km 左右。12 km (约 200 hPa) 以上, 西宁上空 PV 变化不大, 这与图 1a 中连续 3 d 内 12.5 km 以上的臭氧分压变化不明显是一致的。

结合臭氧探空仪实际飞行路线来考察 8 月 1 日的臭氧特殊分布。根据图 1d, 可以估算出 7 月 31 日 12.5 km 以下臭氧探空气球向东平漂了 22 km 左右, 这时臭氧探空仪是远离 PV 舌区(7 月 31 日 04 时的 PV 分布)。8 月 1 日探空气球向东漂移了 24.5 km, 在飞行过程中穿过了 PV 舌区(图 6), 因而观测到了对流层臭氧异常增加。2 日臭氧探空仪基本停留在西宁地区上空, 但折叠区已消失。

图 7 是模式给出 8 月 1 日 03 时西宁上空的散度、涡度以及观测的臭氧垂直分布。臭氧峰值与最大的正涡度值的高度位置是一致的, 这说明确了对流层臭氧峰值区出现在低压气旋性环流之中。散度垂直分布可以看出, 在 6~8 km 有一约 2 km 厚的准无辐散层, 接近文献[16]中估计的准无辐散层平均高度 450 hPa (6.0~6.5 km)。准无辐散层说明了大气存在稳定的分层现象, 这种分层现象在实际观测中则是很强的逆温层的存在(图 1b)。准无辐散层高度附近大气处在一种短暂的平衡状态, 这种平衡抑制了臭氧气团继续向下输送, 同时, 也抑制了水平输送对高浓度臭氧的稀释, 使得富臭氧气团在该高度位置能稳定停留, 并保持平流层气团高臭氧、低水汽等特征。

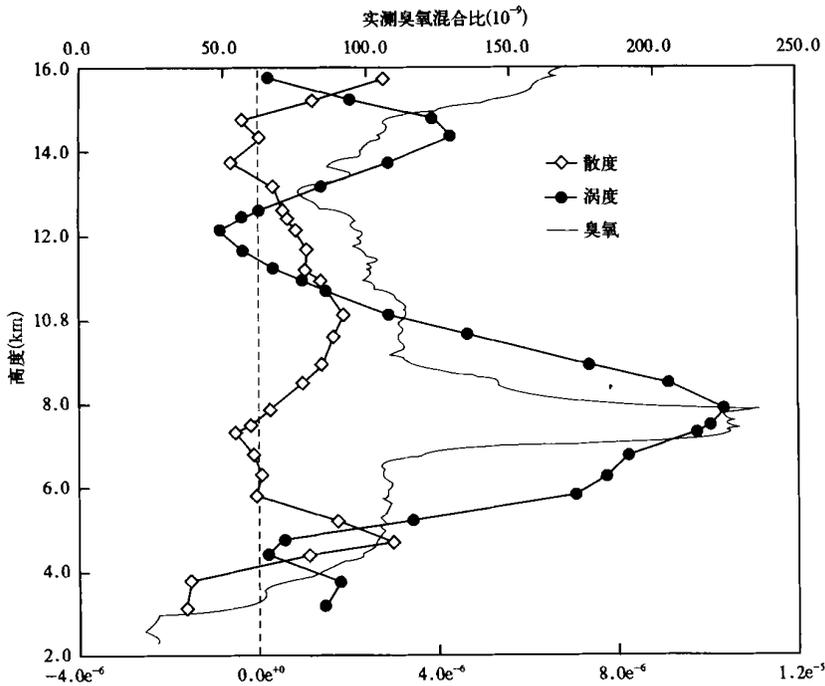


图 7 1996 年 8 月 1 日 03 时西宁上空模拟散度、涡度与臭氧垂直分布的比较

轨迹分析支持了 4 km 附近的臭氧增加也与高空气团的下沉有关。8 月 1 日 PV 在 4~6 km 也明显增加(图 6b), 而且 4 km 以下为辐合、以上为辐散区动力结构(图 7), 这与逆温层(图 1b)也是符合的。这暗示了该高度臭氧增加动力输送机制与 7 km 的基本是相同的, 臭氧的最终来源是平流层向下输送, 但是其实际的动力输送过程可能由于受复杂地形影响(如西宁西北地区的祁连山脉)而没有 7 km 高度那么明显。

## 5 结果与讨论

本文针对 1996 年夏季在西宁一次异常臭氧峰值现象, 用气象观测资料、轨迹模式以及中尺度模式做了一些研究工作, 可以得出以下结果:

(1) 对流层异常的臭氧次峰是在一次高空低压槽快速东移天气条件下发生的, 这也是平流层向下输送的必要条件。轨迹分析可以确认平流层向下输送主要出现在新疆-青海间的高空低压槽区内;

(2) 中尺度过程模拟表明, 对流层顶折叠区随着高空低压槽东移而发展, 是平流层臭氧向下输送一个重要的途径, 也是对流层异常臭氧次峰的来源。350 hPa 等压面上的 PV 演变可以反映出对流层顶折叠区的演变;

(3) 对流层臭氧次峰在对流层高度位置与准无辐散层有关。准无辐散层为臭氧次峰提供了稳定的动力条件, 使得次峰维持并保持了平流层气团特征。

类似于 8 月 1 日这样异常臭氧次峰大都出现在纬度较高的对流层中、高层甚至平流层低层高度范围, 而且都集中在春、秋季<sup>[17, 18]</sup>。本文分析的个例还是比较独特: 它出现在夏季 36°N 的中国西北部地区, 与夏季中国西北地区的高空常发生的短波槽<sup>[19]</sup>是相联系的, 这与青藏高原的主体地区盛行的青藏高压是不一样的。高空短波槽天气系统所引起的平流层臭氧向下输送可能是中国西北地区对流层

臭氧一个重要的源。在 1996 年夏季进行的 29 d 的臭氧探空观测中, 对流层臭氧增加是一个比较普遍的现象<sup>[9]</sup>。而从距西宁比较近的瓦里关山大气本底观象台 (36. 18°N, 100. 54°E, 海拔: 3810 m) 常年的地面臭氧观测结果来看, 夏季 6, 7 月份高山站近地面臭氧是全年中最高的<sup>①</sup>, 相继的模式研究指出, 瓦里关山近地面臭氧受自由大气向下输送的影响还是显著<sup>[20]</sup>。研究平流层臭氧自然向下输送及其对对流层臭氧的收支平衡的工作比较重要, 尤其是对对流层臭氧的背景变化。在这一方面, 中国仍然十分缺少长期系统性的实测资料。

致谢: 臭氧探空观测工作是中国气象科学研究院刘奇俊同志主持的。日本北海道大学 Yamazaki 教授和日本环境研究所的 Koyei 博士提供三维后向轨迹模式; 中国气象科学研究院翁永辉同志帮助进行 MM5 模式的计算工作; 欧洲空间局提供 GOME 数据资料。

## 参考文献

- 1 Danielsen E F, Mohnen V A. Project dust storm report: Ozone transport, in situ measurements, and meteorological analysis of tropopause folding. *J Geophys Res* 1977, 82: 5867~ 5877
- 2 Shapiro M A. Turbulent mixing within tropopause folds as a mechanism for the exchange of chemical constituents between the stratosphere and troposphere. *J Atmos Sci*, 1980, 37: 994~ 1004
- 3 Gouget H, Cammas J P, et al. Ozone peaks associated a subtropical tropopause fold and with the trade wind inversion: A case study from the airborne campaign TROPOZ I I over the Caribbean in winter. *J Geophys Res*, 1996, 101: 25979~ 25993
- 4 Ebel A, Hass H, Jakobs H J, et al. A simulation of ozone intrusion caused by a tropopause fold and cut-off low. *Atmos Environ*, 1991, 25: 2131 ~ 2144
- 5 Ravetta F, Ancellet G, KowolSanten J, et al. Ozone, temperature, wind filed measurements in a tropopause fold: Comparison with a mesoscale model simulation. *Mon Wea Rev*, 1999, 127: 2641~ 2653
- 6 石广玉, 许黎, 郭建东等. 大气臭氧与气溶胶的高空气球观测. *科学通报*, 1986, 20(4): 401~ 407
- 7 孔琴心, 王庚辰, 刘广仁等. 大气臭氧垂直分布的电化学测量. *大气科学*, 1992, 16(5): 636~ 640
- 8 刘奇俊, 郑向东, 罗超等. 青海高原大气臭氧的垂直特征的 ECC 臭氧探空观测. *大气科学进展(英文)*, 1997, 14(16): 481~ 490
- 9 郑向东, 周秀骥, 秦瑜等. 西宁夏季对流层臭氧垂直分布变化与气象要素的关系. *气象学报*, 2002, 60(1): 47~ 52
- 10 Yukitomo Tsutsumi, Yukio Makino, Jensen J. Aircraft measurements of tropospheric ozone over the western Pacific Ocean. *Atmos Environ*, 1996, 30(10~ 11): 1763~ 1772
- 11 Kley D, Crutzen P J, et al. Observations of near-zero Ozone concentrations over the convective Pacific: Effects on air chemistry. *Sciences*, 1996, 274: 230~ 233
- 12 Levy H H, Mahlman J D, Moxim W J. Tropospheric ozone: The role of transport. *J Geophys Res*, 1985, 90: 3753~ 3772
- 13 Yamazaki K, Okada, Iwasaka Y. Where do aerosol particles in the Antarctic upper troposphere come from? ( a case study in January 1983). *J Meteor Soc Japan*, 1989b, 67: 889~ 906
- 14 Shohei Murayama, Yamazaki K, Nakazawa T, et al. Interpretation of high mixing ratios of O<sub>3</sub> observed in the upper troposphere over Syowa Station, Antarctica using a trajectory analysis. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 1177~ 1180
- 15 World Meteorological Organization (WMO). Atmospheric ozone 1985, WMO Report, 1986, 16
- 16 叶笃正, 高由禧等. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1979. 274pp
- 17 Kentarchos, Davis T D, Zerefos, et al. A low latitude stratospheric intrusion associated with a cut-off low. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 67~ 70

① 1995 年瓦里关山大气本底观象台年度工作报告。

- 18 Laugford A O, Master C D, et al. Ozone measurements in a tropopause fold associated with a cut-off low system. *Geophys Res Lett*, 1996, 23: 2501~ 2504
- 19 罗四维等著. 青藏高原及其邻近地区几类天气系统的研究. 北京: 气象出版社, 1992. 12~ 13
- 20 Luo C, John J C, Zhou X J, et al. A non-urban ozone air pollution episode over eastern China: Observations and model simulations. *J Geophys Res*, 2000, 105(D2): 1889~ 1908

## ANALYSIS FOR A CASE OF OZONE DOWNWARD TRANSPORT FROM STRATOSPHERE TO TROPOSPHERE AS OBSERVED OVER XINING, CHINA

Zheng Xiangdong Zhou Xiuji

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Qin Yu

(*Department of Atmospheric Sciences, Peking University, Beijing 100871*)

Tang Jie Li Weiliang

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

### Abstract

A case study on the ozone downward transport from stratosphere to troposphere over Xining (36.43°N, 101.45°E, 2296 m asl) on August 1st, 1996 has been given out by the methods of observational analysis, 3-dimensional backward trajectory calculation and the mesoscale modeling. Routine radiosonde data show that the main synoptic characteristics of this case were the easterly shift of the trough in the upper troposphere. As a result of the synoptics, a pronounced ozone peak was detected around 7 km over Xining. 3-dimensional trajectory calculations imply that the air parcels of ozone peak around 7 km may be traced to the middle Asia region, but the distinguished downward transport from stratosphere to troposphere induced was over the region from Xinjiang to Qinghai. Furthermore, mesoscale simulation confirms that the temporal and spatial evolution of tropopause folding indexed by the potential vorticity is the critical mechanism of such downward incursion. The modeling work also shows that the altitude of tropospheric ozone peak was associated with stable quasi-zero divergence layer, which reflects the temporal dynamical balance in troposphere.

**Key words:** Ozone peak, Backward trajectory, Stratosphere-troposphere exchange, Tropopause folding.