

# 2001 年春季临安地区对流层臭氧异常增加的一次过程分析

崔 宏<sup>1</sup> 赵春生<sup>1</sup> 郑向东<sup>2</sup> 郑永光<sup>1</sup> 秦 瑜<sup>1</sup> 陈尊裕<sup>3</sup> 陈鲁言<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 北京大学物理学院大气科学系, 北京 100871

<sup>2</sup> 中国气象科学研究院地球与环境研究中心, 北京 100081

<sup>3</sup> 香港理工大学土木工程系, 香港红

**摘 要** 2001 年春季在临安(30.30°N, 119.75°E)进行的臭氧垂直探测发现, 从 3 月 25 到 31 日有一次明显的臭氧异常增加过程, 其中尤以 29 日和 30 日对流层上层的臭氧异常增加最具代表性。结合分析地面及高空气象要素演变和高空位势涡度的变化表明, 这是一次显著的平流层空气由上向下穿过对流层顶深入对流层的下传过程, 此平流层对流层交换过程与冷空气南下的天气过程和副热带急流、极锋急流移动造成的辐合下沉运动有着密切的联系。

**关键词** 对流层臭氧增加 平流层对流层交换 副热带急流 对流层顶折叠 位势涡度

文章编号 1006-9895(2005)02-0259-08

中图分类号 P421

文献标识码 A

## Analysis of an Extraordinary Tropospheric Ozone Enhancement Event at Lin-An in the Spring of 2001

CUI Hong<sup>1</sup>, ZHAO Chun-Sheng<sup>1</sup>, ZHENG Xiang-Dong<sup>2</sup>, ZHENG Yong-Guang<sup>1</sup>,  
QIN Yu<sup>1</sup>, CHAN Chuen-Yu<sup>3</sup>, and CHAN Lo-Yin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

<sup>2</sup> Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

<sup>3</sup> Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Hong Kong

**Abstract** An extraordinary ozone enhancement event is observed at Lin-An(30.30°N, 119.75°E) from March 25 to 31 in the spring of 2001, especially on March 29 and 30. The cause of the ozone enhancement is studied utilizing synoptic meteorology diagnosis from conventional weather data and the NCEP data, as well as potential vorticity (PV). It is revealed that the observed secondary ozone peaks in the upper troposphere in this event are associated with a remarkable intrusion of the stratospheric air downward into the troposphere. The stratosphere-troposphere exchange is related to a synoptic system, including a cold high moving southward at surface, an upper trough, a shift of the subtropical jet (STJ) and the polar front jet, and a subsidence at the left side of the STJ entrance.

**Key words** tropospheric ozone enhancement, stratosphere-troposphere exchange, subtropical jet, tropopause fold, potential vorticity

## 1 引言

对流层臭氧垂直分布中出现臭氧异常增加多与对流层中的天气系统造成的动力学过程和物理化学过程

密切相关。一般对流层下部(尤其在 0~2 km 的近地面层)的臭氧次峰大都是当地排放的碳氢化合物和氮氧化物等污染物经光化学反应生成的结果,而中上部的臭氧次峰则多与天气过程及水平和垂直方向的动力

收稿日期 2003-06-13 收到, 2004-02-18 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金 49975026、香港理工大学的 PolyU 5061/99E 和 G-YW 58 研究基金

作者简介 崔宏,女,1973 年出生,博士,目前主要从事臭氧分布研究。E-mail: cecuih@polyu.edu.hk

传输有关<sup>[1,2]</sup>。

许多研究表明,由于极锋急流的作用,与高空锋生、切断低压等天气动力过程联系密切的对流层顶折叠常引发平流层对流层交换,这种以富含臭氧的平流层空气下传为主的交换是中纬地区春季对流层臭氧增加的重要源<sup>[3-7]</sup>。在亚热带等非中纬地区,平流层向对流层的输入是否也是春季对流层臭氧的重要源,目前研究还较少。1961年,Krishnamurti等<sup>[8]</sup>指出,在北半球冬季副热带急流可能有一热力直接环流存在,此环流在急流核和其反气旋切变侧(向赤道端)有上升运动,而在气旋切变侧(极地侧)是下沉运动。如果这些环流在副热带锋(即副热带急流下面的准水平温度梯度带)中传输平流层空气,则可能进行平流层和对流层交换。Breiland<sup>[9]</sup>的研究表明,副热带急流下方有孤立的对流层高臭氧区存在。在副热带急流入口和出口区,水平切变和垂直运动可有效地促进对流层和平流层空气团的混合<sup>[10]</sup>。Gouget等<sup>[11]</sup>指出,亚热带地区也存在与副热带急流密切关联的对流层顶折叠现象,此折叠结构可能对全球平流层对流层臭氧交换起重要作用。但是从全球诊断的观点看,还没有强有力的证据证明副热带地区存在可与中纬相比的平流层对流层交换。

我国对臭氧探空观测的研究开始于20世纪80年代<sup>[12,13]</sup>,在探空观测的基础上,很多大气科学工作者对北京<sup>[14]</sup>、拉萨<sup>[15]</sup>、西宁<sup>[16]</sup>等地获取的臭氧廓线进行了动力学分析与模拟研究,发现对流层顶折叠、非地转环流与不同天气系统对臭氧垂直分布变化均有一定的影响。由于以往的臭氧探空观测与研究大都是在中国北部、西部以及青藏高原上进行的,中国东部及南部的观测和研究较少。为了研究中国南部及东部春季臭氧垂直分布的变化及其成因,从2001年3月初到4月中旬,香港理工大学与北京大学、中国气象科学研究院合作,在香港、浙江临安和云南昆明开展了三地同步臭氧垂直廓线的观测。从临安获得的臭氧探空资料中,发现有一次显著的对流层中、上层(约10 km以上)臭氧异常增加的过程。此过程从3月25日开始,到3月31日结束,其中3月29日和3月30日对流层上部臭氧次峰尤其明显。本文下面将结合天气系统的客观分析与高空位势涡度分析方法,对此次对流层上层臭氧异常增加过程进行诊断和分析,研究臭氧次峰的成因。

## 2 探空观测

在临安(30.30°N,119.75°E)进行的臭氧探空观测应用的是芬兰 Vaisala 公司出品的臭氧探空系统,包括

ECC( Electrochemical Concentration Cell )-6A 型臭氧探空仪、Vaisala RS80/18NE 型无线电气象探空仪和 Vaisala DigiCora MW15 型地面接收系统,可同时获取臭氧和温度、相对湿度、压力、风四种气象要素的垂直廓线,其中风速及风向的测定应用了 GPS 定位系统。探测之前的仪器标定和检测工作严格按照 Vaisala 公司的臭氧探空仪的技术说明和校准程序进行,保证了观测数据的准确和可靠。

图1分别给出对流层上层臭氧异常增加比较明显的三天的探空廓线:3月29日、30日与31日16 km以下的臭氧、温度、比湿、风速廓线,以及2001年3月3日至4月13日在临安进行探空观测得到的所有臭氧探空廓线的平均廓线。从这三天臭氧及各气象要素廓线的垂直变化可以看出,臭氧在对流层上层有较明显的增加:3月29日和30日16 km以下的最高臭氧体积混合比高达 $1200 \times 10^{-9}$ ,而此高度范围内的探空观测平均值在 $300 \times 10^{-9}$ 以下;3月31日臭氧在8 km附近有大于平均值(约为 $70 \times 10^{-9}$ )的明显次峰出现,峰值在 $100 \times 10^{-9}$ 以上。在臭氧次峰开始出现的高度(3月29日到31日分别为8.9 km、6.9 km和6.6 km)上均有

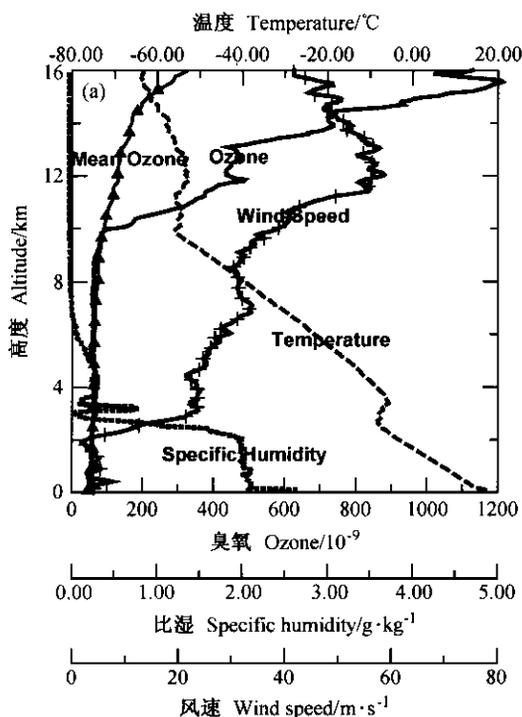


图1 16 km以下臭氧、温度、比湿与风速的探空廓线以及臭氧平均廓线:(a)3月29日;(b)3月30日;(c)3月31日;(d)3月29日到31日6~12 km臭氧廓线的对比图

Fig. 1 The detected profiles of ozone, temperature, specific humidity and wind speed as well as the average ozone profile below 16 km:(a)29 March;(b)30 March;(c)31 March;(d) comparison of ozone profiles between 6 km and 12 km from 29 March to 31 March

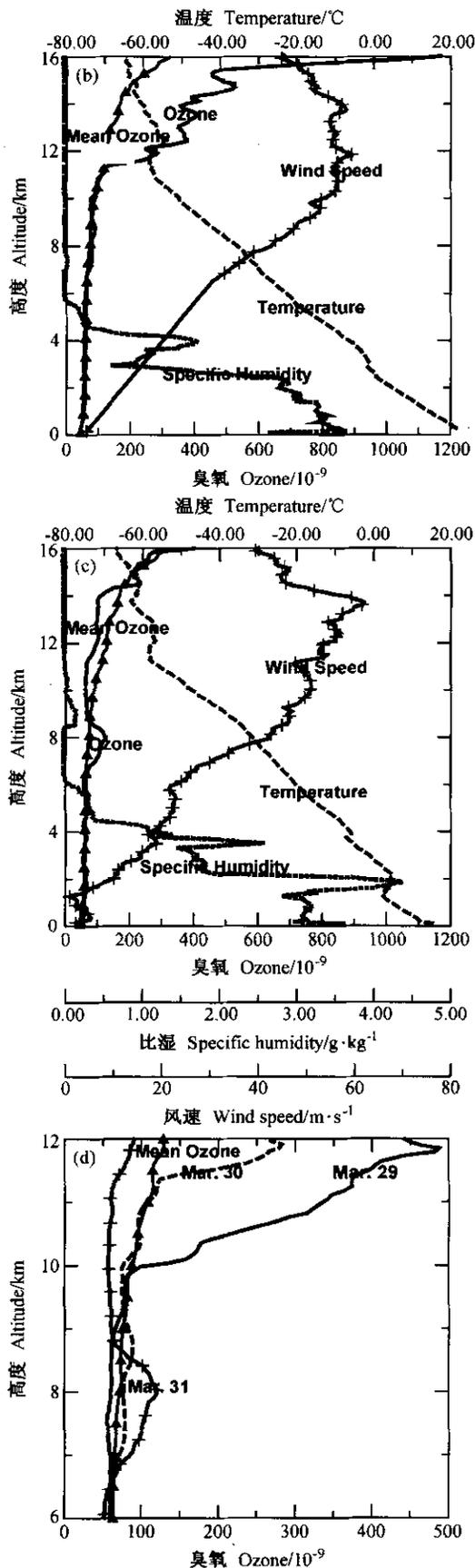


图 1 (续)  
Fig. 1 (Continued)

逆温出现,且比湿值均很低。在风速垂直分布廓线图上 3 月 29 日和 31 日在臭氧开始增加的高度(分别为 10 km 和 7 km)上风速有明显的迅速增加,而 3 月 30 日臭氧次峰对应的风速廓线变化却不明显,但是臭氧次峰都处在高空副热带急流(风速大于 30 m·s<sup>-1</sup>)区内。从图 1d 给出的 6~12 km 臭氧廓线的对比可见,从 3 月 29 日到 31 日,臭氧开始增加的高度逐渐下降:3 月 29 日 10 km 以上臭氧混合比急剧增加,3 月 30 日 7~9 km 的臭氧混合比略高于平均值,而 3 月 31 日在 6.6~8.5 km 有明显的臭氧次峰出现,这种时空变化总体表现出高浓度臭氧下传的趋势。下面我们将从天气系统的客观分析、对流层顶高度的变化及位势涡度变化等天气动力学角度,对这次过程进行定性分析。

### 3 天气及动力分析

#### 3.1 臭氧异常增加过程中天气系统的演变

探空观测所得到的臭氧及气象要素的廓线表明,3 月 29 日和 30 日对流层上层臭氧次峰的出现与明显的逆温和高空急流有一定的联系。图 2a, b 分别给出了 2001 年 3 月 29 日 12 时(世界协调时,下同)东亚地区的地面天气图(根据常规观测资料所绘)和 500 hPa 等压面上的天气形势(根据 NCEP 资料绘制),并在图中标示了从 3 月 26 日 12 时~29 日 12 时每日的冷锋、冷高压位置、冷高压移动路径(地面图上)以及高空槽线的变化(高空图),从中可以看出这次臭氧异常增加过程中的天气形势演变。

由地面天气(图 2a)可见,从 26 日 12 时开始,冷高压中心由蒙古向南移动,27 日到达河套地区,在随后的两天里,这个冷高压中心继续向南偏东方向推进,从而影响了中国东部及南部的大部分地区。与此同时,冷高压前方的冷锋也随之向南向东移动,在 28 日经过临安地区,冷锋经过之处引起大范围的降温。到 29 日 12 时,冷高压已经向东移动到东海地区,中心气压也开始降低,温度有所升高,这说明这个影响了中国东部大部分地区的冷高压已经开始减弱。到 30 日,高压中心向东移到东南沿海和东海地区,日本气旋也有相应的东移,华东及华南大部分地区温度开始回升。由这几天的地面天气形势的演变可见,这是一次显著的冷高压南下的过程,其路径先自北向南而后转向东南,影响了东北、华北、包括临安在内的华东以及华南大部分地区。根据 500 hPa 等压面上表现出来的天气形势(图 2b),受贝加尔湖以东阻塞高压崩溃和蒙古低压向东南移动的影响<sup>[17]</sup>,26 日 12 时开始,中国东北地区有闭合的冷低压中心形成,其槽线由开始几乎平行于纬

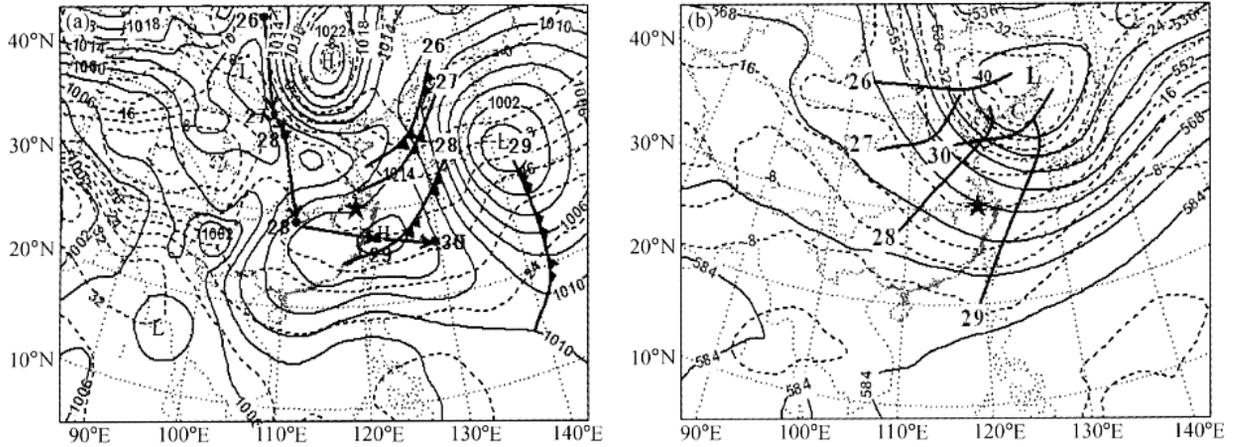


图2 2001年3月29日12时东亚地区的地面天气图和500 hPa等压面上的天气形势(五角星为临安所在位置)(a)由常规观测资料得到的地面天气图(实线为等压线,虚线为等温线,带三角的粗实线为从3月26日开始每日12时的冷锋位置;黑色圆点代表每日冷高压中心所在位置,箭头指示的是冷高压移动路径)(b)根据NCEP资料绘制的500 hPa等压面上的高空天气图(实线为等位势高度线,虚线为等温线,粗实线代表3月26日12时到29日12时每日的槽线)

Fig. 2 Synoptic charts at surface and 500 hPa for 1200 UTC March 29, 2001 in East Asia (A star indicates the location of Lin-An). (a) Synoptic chart at surface (pressure contours in black solid lines and isotherms in dashed lines) with conventional observation weather data. The dark curves with black delta illustrate the shift of the cold front, dark dots are the cold high centers, and the arrows represent the moving line of the cold high from 1200 UTC 26 March to 1200 UTC 30 March. (b) Upper air synoptic chart at 500 hPa (geopotential height contours in black solid lines and isotherms in dashed lines) with the NCEP data, the trough lines from 1200 UTC 26 March to 1200 UTC 29 March are shown by dark curves

线(26日12时)逐渐转变为由东北倾向西南(29日12时),而后又恢复到近似的横向(30日12时)。在这段时间冷空气南下的影响之下,蒙古低压向东南方向移动,南支槽也随之加深和东移,使得临安上空风向逐渐发生变化,由西风转变为西北风。综合这两张天气图可以看出,在2001年3月底对流层上层臭氧明显增加期间,东亚地区地面有冷高压南下影响了中国大部分地区,冷高压移动路径由向南转向向东;500 hPa等压面上有相应的冷低涡形成并有横槽转竖。此天气过程可导致所影响地区温度梯度加大,进一步影响高空急流的强度和位置。因为臭氧在对流层中的生命时间(几天)与天气过程的持续时间相当,这些气象要素的变化都可能影响到对流层臭氧的垂直分布。

由于临安(30.30°N, 119.75°E)地处亚热带,是副热带急流极其活跃的地区。很多对流层臭氧的研究者都指出,副热带急流很可能与发生在热带或亚热带地区的对流层折叠有关,急流入口区和出口区较强的风速切变和垂直运动都有益于平流层对流层交换<sup>[8,10,18]</sup>。高空急流是高空锋区的一个重要特征,可以通过高空风速分布图表现出来<sup>[9]</sup>。从图3可以看出副热带急流和极锋急流的分布和变化。由图3a可见,3月29日06时在200 hPa等压面上,在东海、日本东南部有一西南—东北走向的狭长急流区存在,急流中心最大风速达 $90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,此高空急流即为副热带急流,它影响着华

东及日本的大部分地区。此时探测有对流层上部臭氧增加的临安恰好位于急流入口区的左侧,其上空有较明显的风速切变和下沉运动。一天以后,随着地面冷高压和高空冷低涡的向东推进,200 hPa等压面上的副热带急流中心也向东移动(见图3b),使得临安处于急流入口区的左侧,下沉运动的维持有利于此测站上空高层空气的进一步下传。极锋急流的位置较低,最大风速一般出现在300 hPa高度附近。由图3c和d可以看出,29日06时时300 hPa等压面上有两个明显的急流中心存在,一个是由蒙古向东南方向延伸的极锋急流,一个是由华南向东北延伸到日本的副热带急流,急流的中心位置分别在华北地区和日本东南部,此时临安恰好位于极锋急流中心的出口区与副热带急流的入口区之间,垂直运动较强,到30日06时,300 hPa等压面上的两支急流已经合并为一支,急流中心向东偏北移到远离大陆地区的日本以东洋面,急流核中心风速有所增加,而东亚大陆上空的急流强度已呈减弱趋势,但是临安地区仍受此急流的影响,下沉辐合气流继续维持。

整体看来,此次东亚地区对流层上层臭氧异常增加过程也是一次副热带急流中心由西南向东北移动,与从蒙古地区南移下来的极锋急流在日本附近合并的过程,临安有明显的对流层上层臭氧次峰出现的3月29日和30日高空均有较强的下沉辐合运动。这种下

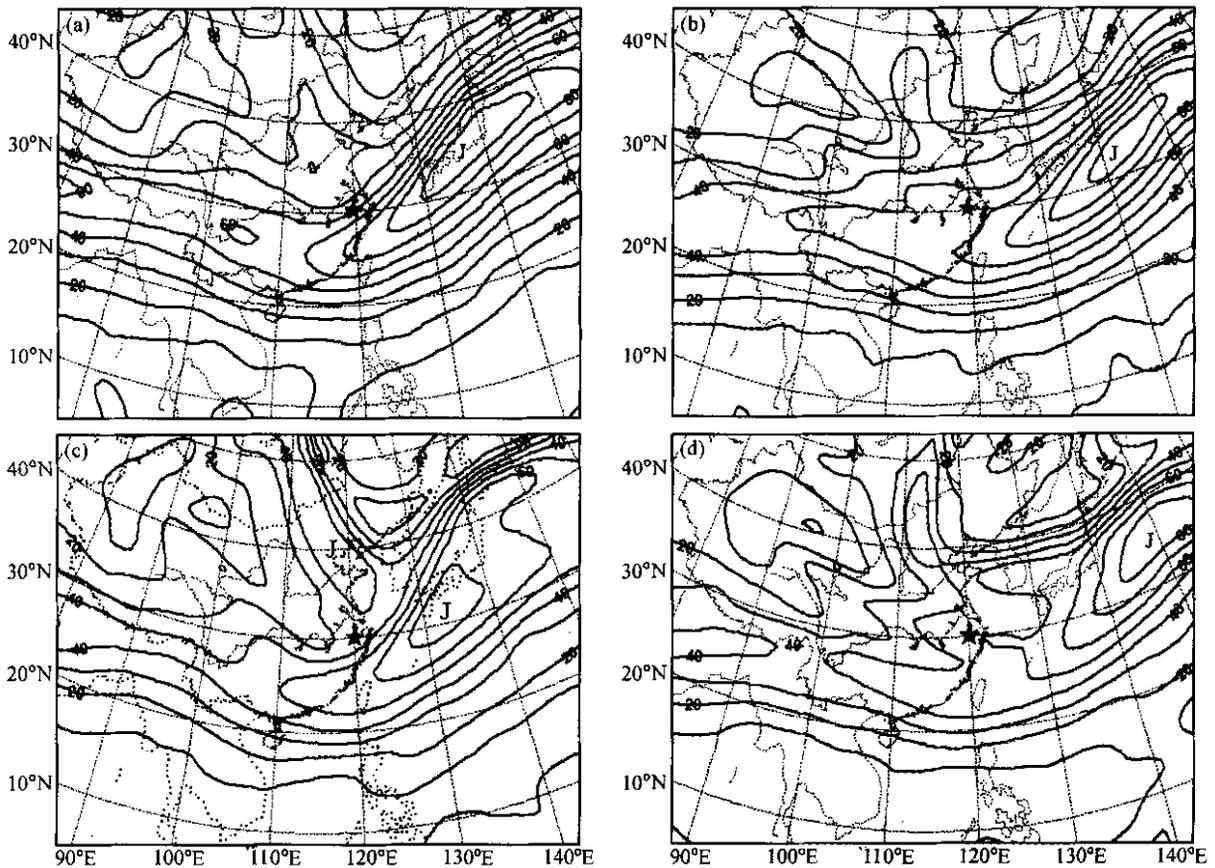


图3 2001年3月29日和30日每日06时的等风速线(实线)分布:(a)29日200 hPa等风速线(b)30日200 hPa等风速线(c)29日300 hPa等风速线(d)30日300 hPa等风速线

Fig. 3 Isotach (solid line) distributions for 0600 UTC:(a) on 29 March at 200 hPa;(b) on 30 March at 200 hPa;(c) on 29 March at 300 hPa;(d) on 30 March at 300 hPa. A star indicates the location of Lin-An

沉辐合运动常常是平流层空气向对流层下传的重要动力机制。

### 3.2 对流层顶高度的变化

在平流层对流层交换过程中,对流层顶高度常会因大气动力环境的改变而变化<sup>[14]</sup>,因此分析对流层顶高度的变化有利于进一步认识交换过程。对流层顶的确定方法有热力学和动力学两种。热力学定义是根据对流层和平流层不同的热力特性给出的:对流层顶为500 hPa等压面以上温度递减率降到 $2\text{ K}\cdot\text{km}^{-1}$ 或以下并至少保持2 km的最低边界<sup>[20]</sup>,此定义理论上对全球都适用。但是,由于稳定度变化有时相对平滑,有时在垂直方向上存在多个稳定层(急流和上层锋附近),热力学定义常会导致对流层顶不明确<sup>[4,21]</sup>。于是,一些研究者提出了基于位势涡度的对流层顶的“动力学定义”<sup>[3,4]</sup>通过确定位涡阈值来定义对流层顶。

表1给出了3月25日到31日每天的热力学和动力学对流层顶高度以及探测到的臭氧明显增加的起始高度,其中动力学定义对流层顶时采取的位涡阈值是

$2\text{ PVU}$ ( $1\text{ PVU} = 10^{-6}\text{ K}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),阈值的确定在文献<sup>[22]</sup>中有详细的讨论。由表1可见,采用热力学定义对流层顶时,25日、29日、30日和31日均有二、三个对流层顶存在,而动力学定义用位涡确定的对流层顶的移动不依赖于绝热辐合,主要由空气的三维运动来决定,因此动力学定义对流层顶可以保证更大的时空表1 2001年3月25日至31日对流层顶高度的变化以及臭氧增加的起始高度

Table 1 The tropopause height and prime altitude of ozone enhancement from 25 to 31 March 2001

日期 Date	热力学对流层顶高度 Height of thermally defined tropopause (gpm)	动力学对流层顶高度 Height of dynamically defined tropopause (gpm)	探测到的臭氧明显增加的起始高度 Prime altitude of ozone enhancement (gpm)
25 Mar	13935/17425	12023	9826
27 Mar	15135	11695	7209
29 Mar	9921/15495	10467	8873
30 Mar	11215/14513	10773	6860
31 Mar	11297/13716/16380	11465	6566

尺度上的连续性<sup>[23]</sup>。对比动力学对流层顶高度与探测到的臭氧明显增加的起始高度可以看出,从 25 日到 29 日,对流层顶高度有所降低,而 30 日和 31 日的对流层顶则有所升高,这说明这次平流层—对流层交换在 29 日最强,而后有减弱趋势,这与臭氧探空观测结果和天气诊断分析的结果一致;探测到的臭氧明显增加的起始高度则从 29 日开始有所下降,显示比较强的平流层臭氧侵入对流层上层后有向下输送的趋势,从而 31 日在 8 km 附近有大于  $100 \times 10^{-9}$  的臭氧次峰出现。

### 3.3 位势涡度的变化

已有很多研究表明,臭氧的垂直分布与位势涡度的垂直分布有明显的正相关关系,接近对流层顶的对流层上部位涡值的升高是平流层空气下沉向对流层输入臭氧的一个明显指示<sup>[18]</sup>,因为作为保守变量的位涡与气流的动力过程密切相关<sup>[24]</sup>。为了确定临安 3 月 29 日与 30 日对流层上部出现的明显的臭氧次峰是否是平流层空气向下输入的结果,有必要研究对流层上层位势涡度的变化。由于这次臭氧异常增加过程中的臭氧从约 10 km 高度(近似为 300 hPa)处向上开始增加,所以选取 300 hPa 等压面来研究高空位势涡度的变化,并对临安臭氧增加非常明显的 3 月 29 日和 30 日进行位涡、位温和风速垂直剖面分析。

图 4 给出了 3 月 29 日和 30 日 300 hPa 等压面上位涡(利用 NCEP 资料计算所得)的分布变化。在 29 日 06 时的位涡分布图(图 4a)上可见,最大位涡高值中心位于朝鲜半岛西北部,中心周围等值线梯度和曲率较大,位涡高值舌由中心向南延伸后在东海转向西南方向,从而影响长江下游及其以南大部分地区。高位涡中心两侧的高位涡梯度区恰好与 300 hPa 等压面风速分布图(图 3c)上的极锋急流和副热带急流分别对应。

此时,临安恰好位于位涡高值舌内,对应于 300 hPa 等压面风速分布图上的急流入口区左侧——气流下沉辐合区。至 3 月 30 日 6 时,高位涡中心强度和位置虽然变化不大,但其分布形式已由 29 日的一个高值中心型变为朝鲜半岛东北与日本北中部各有一位涡高值中心的两中心型,周围的等值线虽然仍然较密,但是已趋于平缓,位涡高值舌有明显的回缩趋势,并不再影响长江下游以南地区,但临安仍位于高位涡分布区内。对比 300 hPa 等压面上的风速分布(图 3c、d)与位势涡度分布(图 5a、b)可以看出,此次对流层 10 km 以上臭氧急剧增加过程与副热带急流中心东移引起的高空下沉运动和气流辐合的加强有密切的关系,急流区左侧的风场分布和极强的风速切变、垂直运动促进了高位涡中心和高位涡舌的发展。此外,图 4 显示出的舌状高位涡区也与对流层中上层的南支槽有明显的对应关系<sup>[17]</sup>。这说明位涡所显示的動力过程与高空槽和急流等天气系统有着密不可分的联系。

由图 5a 可以看到,3 月 29 日在 25°N 附近 11~14 km 高度处和 38°N 附近 7~9 km 高度处各有一急流中心存在,偏南的是强度较大的南支副热带急流,北面强度较小且高度较低的是北支的极锋急流,这两支急流的北部下方各有一明显的舌状位涡高值区存在,表现出对流层顶折叠的显著特征,临安(30.30°N)上空恰好在副热带急流北面的舌状位涡高值区内,臭氧开始明显增加的高度(9~10 km)上有较大的位涡梯度,位温等值线也有明显的向下倾斜,说明此时临安上空的大气斜压性较强,这些动力特征均有利于平流层空气下传;在 3 月 30 日的剖面图(图 5b)上,两个风速高值中心区合并为一个,这与 300 hPa 等压面风速分布图显示的情形一致,相应地,两支急流对应的舌状位涡高值

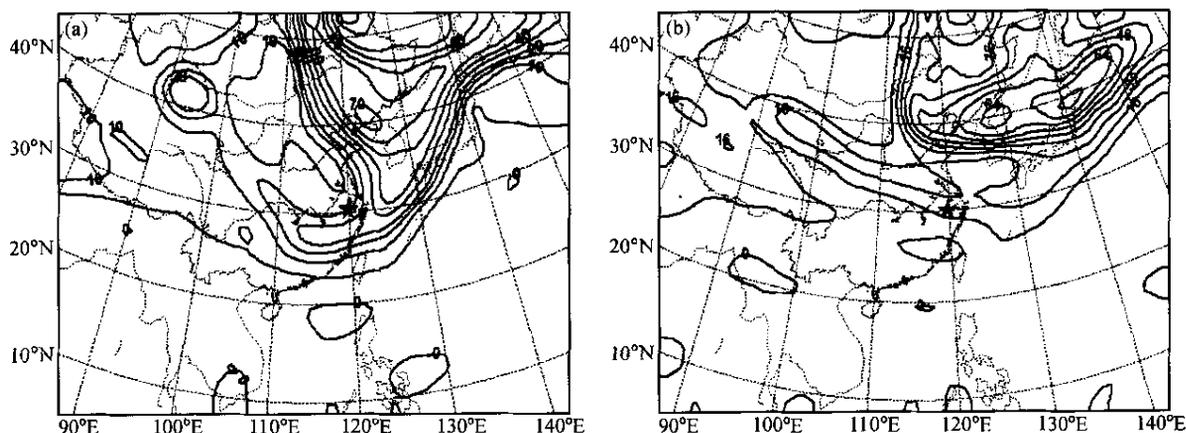


图 4 2001 年 3 月 29 日(a)和 30 日(b)每日 06 时 300 hPa 等压面上的位势涡度(实线,单位  $10^{-7} \text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )分布

Fig. 4 PV (solid lines and in  $10^{-7} \text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) plots at 300 hPa for 0600 UTC (a) 29 March and (b) 30 March

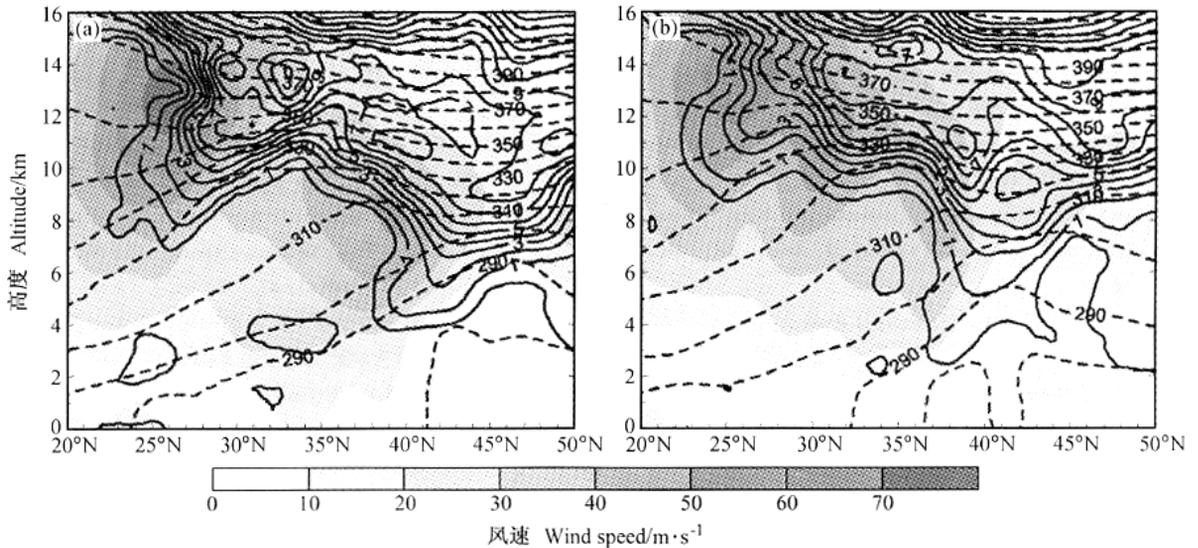


图 5 2001 年 3 月 29 日 (a) 和 30 日 (b) 06 时沿 120°E (临安) 的位涡 (实线, 单位 PVU)、位温 (虚线, 单位 K) 和风速 (阴影区, 单位  $m \cdot s^{-1}$ ) 的垂直剖面图 (其中位涡和位温由 NCEP 资料计算得到)

Fig. 5 The vertical cross sections of PV (solid lines and in PVU), PT (Potential Temperature, dashed lines and in K) and wind speed (filled with shadows and in  $m \cdot s^{-1}$ ) along 12°E (Lin-An) for 0600UTC (a) 29 March and (b) 30 March. Both PV and PT are derived from NCEP data

区和位温等值线的斜率也有所减小,表明此时大气的斜压性已有所减弱,但是临安上空 10 km 以上仍有较大的位涡梯度,因此,仍有平流层空气继续下传进入对流层造成临安对流层上部臭氧增加。

综合以上天气过程诊断、对流层顶高度变化与位势涡度动力学分析,3 月 25 日到 31 日在临安探测到对流层上层臭氧的异常增加是一次明显的与天气系统发展密切关联的平流层空气下传过程。地面的强冷高压南下伴有高空低压槽的发展和急流中心的移动,副热带急流区下方大气较强的斜压性、急流入口区左侧的强下沉和辐合都促进了上层空气向下输运。此探测结果有力地说明,东亚亚热带地区春季有较强的平流层对流层交换,富含臭氧的平流层空气下传进入对流层很可能是春季亚热带地区对流层臭氧增加的重要源。

### 4 讨论

在 2001 年春季在临安进行的臭氧垂直探空观测中发现,从 3 月 25 日到 31 日,对流层中、上层(约 8~10 km)以上有一次明显的臭氧异常增加过程,其中 29 日和 30 日的臭氧次峰最为显著。从天气系统的演变、对流层顶高度的变化和位势涡度变化等方面的分析表明,这次对流层中、上部臭氧异常增加主要来源于平流层富含臭氧的气团穿过断裂的对流层顶向下输运,而这种平流层空气的下传与冷高压南下的天气过程、副热带急流中心的移动引起的入口区左侧下沉辐合运动的增强等动力过程有着密切的联系。

层中、上层臭氧异常增加的研究成果,中纬地区最活跃的平流层—对流层交换一般发生在对流层高层,诸如近急流区、槽区、切断低压等气旋式流场区域中,并常伴有地面气旋的生成和对流层顶附近的锋生<sup>[4, 25]</sup>。而这次在临安进行臭氧垂直探空观测得到的由平流层空气下传导致的对流层中、上层臭氧的异常增加却伴随着冷高压南下的天气过程,这与 Cooper 等<sup>[26]</sup>在弗吉尼亚大草原观测到的与臭氧增加有关的天气系统相同,Cooper 指出,臭氧的增加一般与地面的反气旋和干燥天气有关,而臭氧减少则常伴有地面低压系统。这也许表明,在亚热带,发生在春季与副热带急流活动有关的平流层—对流层交换可能与中纬地区的动力机制有所不同。Ramond 等<sup>[27]</sup>通过观测水汽场研究了副热带急流和极锋急流之间的急流锋带周围的差异,认为极锋急流的经典概念可能并不适用于副热带急流。Folkens 和 Appenzeller<sup>[28]</sup>在飞机观测实验中注意到,在加利福尼亚和塔希提岛之间穿过副热带急流时,臭氧混合率和位势涡度均有极大的突变。目前,还没有研究说明有适用于亚热带地区与副热带急流有关的平流层—对流层交换研究的不同于极锋急流的方法。总之,在亚热带地区臭氧垂直分布变化和不同于极锋急流的副热带急流引起的平流层—对流层交换机制研究方面,仍存在很多亟待解决的问题,还有待于大气科学工作者的进一步合作研究和努力。

### 参考文献

[ 1 ] Chan L Y, Liu H Y, Lam K S, et al. Analysis of the seasonal behavior of

根据大量中纬地区平流层—对流层交换引起对流

- tropospheric ozone at Hong Kong. *Atmos. Environ.*, 1998, **32**: 159 ~ 168
- [ 2 ] Baray J L, Ancellet G, Randriambelo T, et al. Tropical cyclone Marlene and stratosphere-troposphere exchange. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**: 13953 ~ 13970
- [ 3 ] Reed R J. A study of a characteristic type of upper-level frontogenesis. *J. Meteor.*, 1955, **12**: 226 ~ 237
- [ 4 ] Danielsen E F. Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. *J. Atmos. Sci.*, 1968, **25**: 502 ~ 518
- [ 5 ] Appenzeller C, Davies H C. Structure of stratospheric intrusions into the troposphere. *Letters to Nature*, 1992, **358**: 570 ~ 572
- [ 6 ] Price J D, Vaughan G. The potential for stratosphere troposphere exchange in cut-off-low systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1993, **119**: 343 ~ 365
- [ 7 ] Van Haver P, De Muer D, Beckmann M, et al. Climatology of tropopause folds at midlatitudes. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**: 1033 ~ 1036
- [ 8 ] Krishnamurti T N. The subtropical jet stream of winter. *J. Meteor.*, 1991, **18**: 172 ~ 191
- [ 9 ] Breiland J G. A case study of the vertical distribution of atmospheric ozone. *J. Appl. Meteor.*, 1965, **4**: 357 ~ 364
- [ 10 ] Allam R B, Tuck A F. Transport of water vapor in a stratosphere-troposphere general circulation model, I: Fluxes. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1984, **110**: 321 ~ 356
- [ 11 ] Gouget H, Cammas J P, Marenco A, et al. Ozone peaks associated with 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**: 25979 ~ 25993
- [ 12 ] 石广玉, 许黎, 吕位秀, 等. 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*, 1986, **31**(15): 1165 ~ 1167  
Shi Guangyu, Xu Li, Lü Weixiu, et al. A balloon observation of the vertical distribution of atmospheric ozone and aerosols below 33 km. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1986, **31**(15): 1165 ~ 1167
- [ 13 ] 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  
Kong Qinxin, Wang Gengchen, Liu Guangren, et al. A electrochemical measurement of the vertical distribution of ozone in the atmosphere. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1992, **16**(5): 636 ~ 640
- [ 14 ] 郑向东, 李维亮, 周秀骥, 等. 臭氧垂直分布个例观测中次峰现象的诊断分析. *自然科学进展*, 2001, **11**(11): 1181 ~ 1185  
Zheng Xiangdong, Li Weiliang, Zhou Xiuji, et al. A diagnostic study of a case with secondary peaks in vertical ozone distribution observation. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2001, **11**(11): 1181 ~ 1185
- [ 15 ] Liu Qijun, Zheng Xiangdong, Luo Chao, et al. Ozone vertical profile characteristics over Qinghai Plateau measured by Electrochemical Concentration Cell ozonesondes. *Advances in Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1997, **14**(4): 481 ~ 490
- [ 16 ] 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  
Zheng Xiangdong, Zhou Xiuji, Qin Yu, et al. Variations in vertical distribution of tropospheric ozone and relationship with meteorological elements over Xining in summer season. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60**(1): 47 ~ 52
- [ 17 ] 郑永光. 中国南部春季臭氧的观测研究及对流层垂直分布变化分析. 北京大学博士学位论文, 2002  
Zheng Yongguang. Characteristics of vertical ozone distribution and variation of tropospheric ozone in the spring over southern China. Ph. D. dissertation (in Chinese), Peking University, 2002
- [ 18 ] Baray J L, Ancellet G, Taupin F G, et al. Subtropical tropopause break as a possible stratospheric source of ozone in the tropical troposphere. *J. Atmos. Terres. Phys.*, 1998, **60**: 27 ~ 36
- [ 19 ] 张元箴. 天气学教程. 北京: 气象出版社, 1992. 206 ~ 220  
Zhang Yuanzhen. *Course of Synoptic Meteorology* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1992. 206 ~ 220
- [ 20 ] World Meteorological Organization (WMO). Atmospheric ozone 1985. WMO Report, **16**, WMO, Geneva Switzerland, 1986
- [ 21 ] Reiter E R. Stratospheric-tropospheric exchange processes. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1975, **13**(4): 459 ~ 474
- [ 22 ] Cui Hong, Zhao Chunsheng, Qin Yu, et al. An estimation of ozone flux in a stratosphere-troposphere exchange event. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(2): 167 ~ 174
- [ 23 ] Hoerling M P, Schaack T K, Lenzen A J. Global objective tropopause analysis. *Mon. Wea. Rev.*, 1991, **119**: 1816 ~ 1831
- [ 24 ] Appenzeller C, Holton J R, Rosenlof K H. Seasonal variation of mass transport across the tropopause. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 15071 ~ 15078
- [ 25 ] Uccellini L W, Keyser D, Brill K F, et al. The Presidents' Day Cyclone of 18 - 19 February 1979: influence of upstream trough amplification and associated tropopause folding on rapid cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 1985, **113**: 962 ~ 988
- [ 26 ] Cooper O R, Moody J L. Meteorological controls on ozone at an elevated eastern United States regional background monitoring site. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(D5): 6855 ~ 6869
- [ 27 ] Ramond D, Corbin H, Desbois M, et al. The dynamics of polar jet stream as depicted by the METEOSAT WV Channel radiance fields. *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**: 2164 ~ 2176
- [ 28 ] Folkins I, Appenzeller C. Ozone and potential vorticity at the subtropical tropopause break. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**: 18787 ~ 18792