

郑永光, 陈 炯, 陈尊裕等. 中国南部对流层中上层臭氧增加的气象场判识及臭氧变化的多尺度特征. 地球物理学报, 2008, 51(3): 668~681

Zheng Y G, Chen J, Chan C Y, et al. Identifying method of ozone enhancement and multi-scale characteristics of ozone change in the mid-upper troposphere over South China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(3): 668~681

中国南部对流层中上层臭氧增加的气象场 判识及臭氧变化的多尺度特征

郑永光¹, 陈 炯¹, 陈尊裕², 陈鲁言²

1 国家气象中心, 北京 100081

2 香港理工大学土木与结构工程学系, 香港

摘 要 副热带急流对中国南部地区对流层中上层臭氧浓度的影响程度及地理范围目前还研究较少, 且缺乏综合使用常规气象资料及卫星资料来判识对流层中上层臭氧浓度增高的方法. 本文利用 NCEP 再分析与最终分析资料、日本 GMS-5 地球静止卫星水汽云图资料, 以 2001 年 3 月 27~29 日中国南部的临安、昆明、香港臭氧探测个例为基础, 结合 1996 年 3 月 29 日香港与 2001 年 4 月 13 日临安对流层中上层高浓度臭氧分布个例对副热带急流对中国南部对流层中上层臭氧浓度的影响进行了详细分析, 提出根据气象要素场判识春季中国南部对流层中上层臭氧浓度增高的充分条件为根据卫星水汽图像上的暗区、高空急流入口区的左侧辐合区、高空锋区、对流层中上层 ≥ 1 PVU 的向下伸展的舌状高位涡区来综合判断. 本文的分析结果表明, 本文个例中对流层中上层高浓度臭氧来自平流层; 香港对流层中上层低浓度臭氧来自热带海洋地区. 不仅臭氧垂直廓线的多个极小与极大值表明臭氧垂直分布的多尺度变化特征, 而且对流层中上层 PV 分布以及卫星水汽图像分析也表明大气中的多尺度运动对臭氧垂直分布特征有显著影响. 本文的结果表明与副热带高空急流相联系的平流层空气侵入不仅发生在中国大陆的较高纬度地区, 较低纬度的昆明与香港地区也有平流层空气侵入导致对流层中上层臭氧浓度升高.

关键词 中国南部, 对流层中上层, 高臭氧, 气象要素判识方法, 多尺度

文章编号 0001-5733(2008)03-0668-14

中图分类号 P421

收稿日期 2007-05-14, 2008-03-25 收修定稿

Identifying method of ozone enhancement and multi-scale characteristics of ozone change in the mid-upper troposphere over South China

ZHENG Yong-Guang¹, CHEN Jiong¹, CHAN Chuen-Yu², CHAN Lo-Yin²

1 National Meteorological Center, Beijing 100081, China

2 Center of Urban Environmental Technology and Management, Department of Civil and Structural Engineering,
The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Hong Kong, China

Abstract Not only there are fewer studies on the influence of subtropical upper jet stream on the ozone distribution in the mid- and upper troposphere over South China, but also there is no comprehensive method to identify the ozone enhancement in the mid- and upper troposphere using the conventional meteorological and satellite data. Ozone enhancement and loss were observed in the mid- and upper troposphere over Lin'an, Kunming and Hong Kong on 27 and 29 March 2001 using the electric chemical cell (ECC) ozonesondes, and the upper tropospheric ozone enhances

基金项目 国家自然科学基金(49975026)、Research Grant Council of Hong Kong (PolyU 5061/99E)、The Hong Kong Polytechnic University (G-YW 58)共同资助。

作者简介 郑永光,男,1974年生,副研究员,2002年7月北京大学物理学院大气科学系气象学专业博士毕业,主要从事对流层臭氧与中尺度气象学研究. E-mail: zhengyg@cma.gov.cn

over Hong Kong on 29 March 1996 and over Lin'an on 13 April 2001. Based on the data of NCEP reanalyses and final analyses, GMS-5 water vapor imagery, the enhanced ozone source and the multi-scale characteristics of ozone change in the mid- and upper troposphere over South China are analyzed. Furthermore, the sufficient conditions of meteorological fields are proposed as follows to identify ozone enhancement in the mid- and upper troposphere over South China in springtime: dark areas in the water vapor imagery of satellite, convergent areas on the left of upper jet stream, upper frontal areas, and high PV (≥ 1 PVU) areas in the mid- and upper troposphere. The results show that the enhanced ozone in the mid- and upper troposphere over South China is from stratosphere through the folding dynamic tropopause or broken thermal tropopause in the cases of Hong Kong 29 March 1996, Kunming 27 March 2001, Lin'an 29 March and 13 April 2001. For the case of Hong Kong on 27 and 29 March 2001, the enhanced ozone comes from stratosphere over midlatitudes and the low ozone is from the air mass over tropical ocean. Not only the minima and maxima of the ozone vertical distribution can indicate the multi-scale characteristic of ozone change, but also the case of Lin'an on 27 March 2001 shows that the atmospheric multi-scale circulations have an obvious impact on the vertical ozone distribution by means of the analyses of potential vorticity distribution and the GMS-5 water vapor images. The results in this paper also indicate that the intrusion of stratospheric air to the mid- and upper troposphere occurs not only in the higher latitudes but also in the lower latitudes (in this paper over Kunming and Hong Kong) over South China.

Keywords South China, Mid-upper troposphere, Ozone enhancement, Identifying method, Multi-scale

1 引 言

与极锋急流相联系的平流层空气侵入导致对流层臭氧增加经常发生在中高纬度地区^[1~3], 因此相关的研究很多. Danielsen 与 Mohnen^[3]指出由于春季中纬度大气的斜压性增强中纬度地区春季发生对流层顶折叠的现象大约占全年的 50%~100%. 在副热带地区, 副热带急流也能够导致平流层的空气进入对流层中^[4]. Gouget 等^[4]发现 1991 年 1 月 12 日 21 UTC 在加勒比海 Pointe-à-Pitre 岛 (61.5°W, 16.3°N) 上空 7.5 km 高度的高浓度臭氧来自与副热带急流天气系统相联系的平流层空气下沉, 但该地区副热带急流强度比东亚地区副热带急流要弱得多.

虽然平流层臭氧向对流层的输送是对流层臭氧的一个重要来源, 但是西北太平洋地区地面春季臭氧最大值^[5]以及瓦里关地面夏季臭氧高值^[6,7]的形成原因更为复杂, 其形成原因是否由平流层的向下输送导致的还存在较多的争论^[6,7]. 由于副热带急流与副热带地区的高空锋区联系在一起, 而高空锋区是对流层和平流层之间显著的质量交换区, 因此

它的变化对对流层臭氧浓度的变化有着重要的影响. 但是, 目前副热带急流对中国大陆地区对流层臭氧分布的影响研究则较少, 特别是副热带急流对中国大陆臭氧分布的影响地理范围研究则更少, 并且缺乏使用气象常规观测资料与卫星资料来综合判断对流层中上层臭氧浓度增加的方法.

2001 年春季北京大学、中国气象科学研究所和香港理工大学联合实施了昆明 (25.03°N, 102.68°E)、临安 (30.30°N, 119.75°E) 和香港特别行政区 (22.31°N, 114.17°E) 三个地点为期一个半月的国内首次联合同步探测对流层臭氧垂直分布的实验, 以获取不同地点同一时段对流层臭氧垂直分布变化的系统资料, 并在此基础上开展对流层臭氧短期变化机理的科学研究^[8]. 郑永光等对比分析了 2001 年观测实验期间临安、昆明和香港臭氧垂直分布特征^[8], 并对昆明地区对流层中下层高浓度臭氧的来源进行了分析研究^[9,10]. 在这次臭氧观测实验期间, 3 月 27~29 日的临安^[11]、昆明、香港地区以及 4 月 13 日的临安地区在对流层中上层观测到异常的高浓度臭氧分布^[8]. 崔宏等分析了 2001 年 3 月 29~30 日的临安地区对流层高浓度臭氧的来源为平流层^[11], 其分析的重点为天气系统的演变以及位涡变化. 此外, 王卫

国等^[12]利用 1958~2001 年的臭氧混合比和 ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecast) 资料,采用 Wei 诊断模型定量计算了穿越全球对流层顶的臭氧质量通量;江芳等^[13]研究了云顶以下臭氧对 TOMS 反演臭氧总量的影响。

本文在重点分析 2001 年 3 月 27~29 日这段时间临安、昆明、香港臭氧观测个例的基础上,结合 1996 年 3 月 29 日香港与 2001 年 4 月 13 日临安个例来分析中国南部地区对流层中上层高臭氧的来源及臭氧的多尺度变化特征,并提出中国南部春季对流层中上层高浓度臭氧来源的气象场判识方法以利用常规的气象观测资料和卫星资料来推测对流层中上层臭氧的可能变化。

2 资料及其来源

2001 年 3~4 月在临安、昆明与香港三个地点进行的臭氧探空观测实验使用的仪器为芬兰 Vaisla 公司制造的 6A 型电化学臭氧探空仪(ECC)及其气象探空仪^[8]。在实验中,严格地按 Komhyr^[14]在 1986 年制定操作规范进行,以最大限度减少观测误差。本文所用的资料还包括 NCEP(National Center for Environmental Prediction, 美国环境预报中心)再分析与最终分析资料、日本 GMS-5 (Geostationary Meteorological Satellite 5, 第 5 代地球静止气象卫星)水汽云图资料。NCEP 再分析资料每 6 小时 1 次,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 100 hPa 以下为 11 个标准等压面;NCEP 最终分析资料的时间分辨率为 6 小时 1 次,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, 垂直分辨率 1000~900 hPa 为 25 hPa, 900~100 hPa 为 50 hPa。

3 臭氧观测与天气实况

3.1 臭氧、温度与湿度的垂直廓线分布特征

图 1 给出了 1996 年 3 月 29 日香港与 2001 年 3 月 27~29 日昆明、临安和香港三地以及 2001 年 4 月 13 日临安对流层臭氧的体积混合比浓度垂直分布廓线图。

从图 1(a, b, d, g)中可以看到,与平均的臭氧体积混合比浓度比较,1996 年 3 月 29 日香港、2001 年 3 月 27 日昆明与 3 月 29 日、4 月 13 日临安对流层中上层臭氧浓度有较大幅度的升高,且有非常低

的相对湿度,但不同的观测臭氧浓度增加的特征有所不同。图 1c 中临安 2001 年 3 月 27 日对流层中上层臭氧浓度较平均值低,图 1(e, f)中香港对流层中上层的臭氧浓度部分层次升高,部分层次降低。

1996 年 3 月 29 日香港(图 1a)5.5 km 高度以上臭氧浓度均高于平均值,9~16 km 高臭氧浓度特征突出,超过 120 ppbv。2001 年 3 月 27 日昆明(图 1b)8~16 km 高度臭氧浓度显著增加,8 km 高度臭氧浓度超过 120 ppbv。在临安,3 月 27 日(图 1c)6~10 km 高度臭氧浓度比均值略有增加,最大达 90 ppbv, 10~16 km 高度臭氧浓度明显低于均值,但到 29 日(图 1d),10 km 以上高度臭氧浓度急剧增加,其在 16 km 高度浓度超过 1200 ppbv(图上未能标出,表明具有平流层臭氧分布特征)。虽然香港 2001 年 3 月 27 日(图 1e)的 11~14.5 km 高度有一低臭氧区,但是,在 8~11 km 和 14.5~16 km 高度臭氧浓度高于平均值;香港 3 月 29 日(图 1f)的 10 km 高度以上臭氧廓线与香港 27 日形态类似,但 16.5~18 km 高度的臭氧浓度比 27 日更高,其数值明显高于均值。2001 年 4 月 13 日(图 1g)临安上空 8.5~14 km 的对流层中上层又观测到明显高于平均值的高浓度臭氧分布,其臭氧分布形态特征有些类似于 2001 年 3 月 27 日昆明,高浓度臭氧分布形态中又有较低浓度的极小值分布。

从温度的垂直廓线来看,1996 年香港(图 1a)、2001 年昆明(图 1b)、2001 年 3 月 29 日临安(图 1d)与香港(图 1f)、2001 年 4 月 13 日的临安(图 1g)对流层中下层存在逆温层或者明显减小的温度递减率(图中圆圈处),这表明有锋面系统活动。在对流层中上层,较高的臭氧浓度有较低的热力对流层顶高度(图中箭头指示为热力对流层顶高度所在的位置),其中临安在 2001 年 3 月 29 日的第一对流层顶高度已经降为了 9921 gpm(图 1d)。在 1996 年香港个例与 2001 年 3 月 27 日昆明和 29 日香港的对流层顶高度也有不同程度的降低。3.4 节将讨论这些个例中对流层顶与臭氧总量的变化。

通过对比相对湿度与臭氧的垂直分布廓线可以看到,较高浓度臭氧对应于较低的相对湿度,较低浓度臭氧对应于较高的相对湿度。由于对流层高层水汽变化具有一定的保守特性,且有大气运动被动示踪物的作用^[15],因此从本文的个例来看高浓度臭氧空气来自干空气团,低浓度臭氧的空气来自较潮湿的空气团。

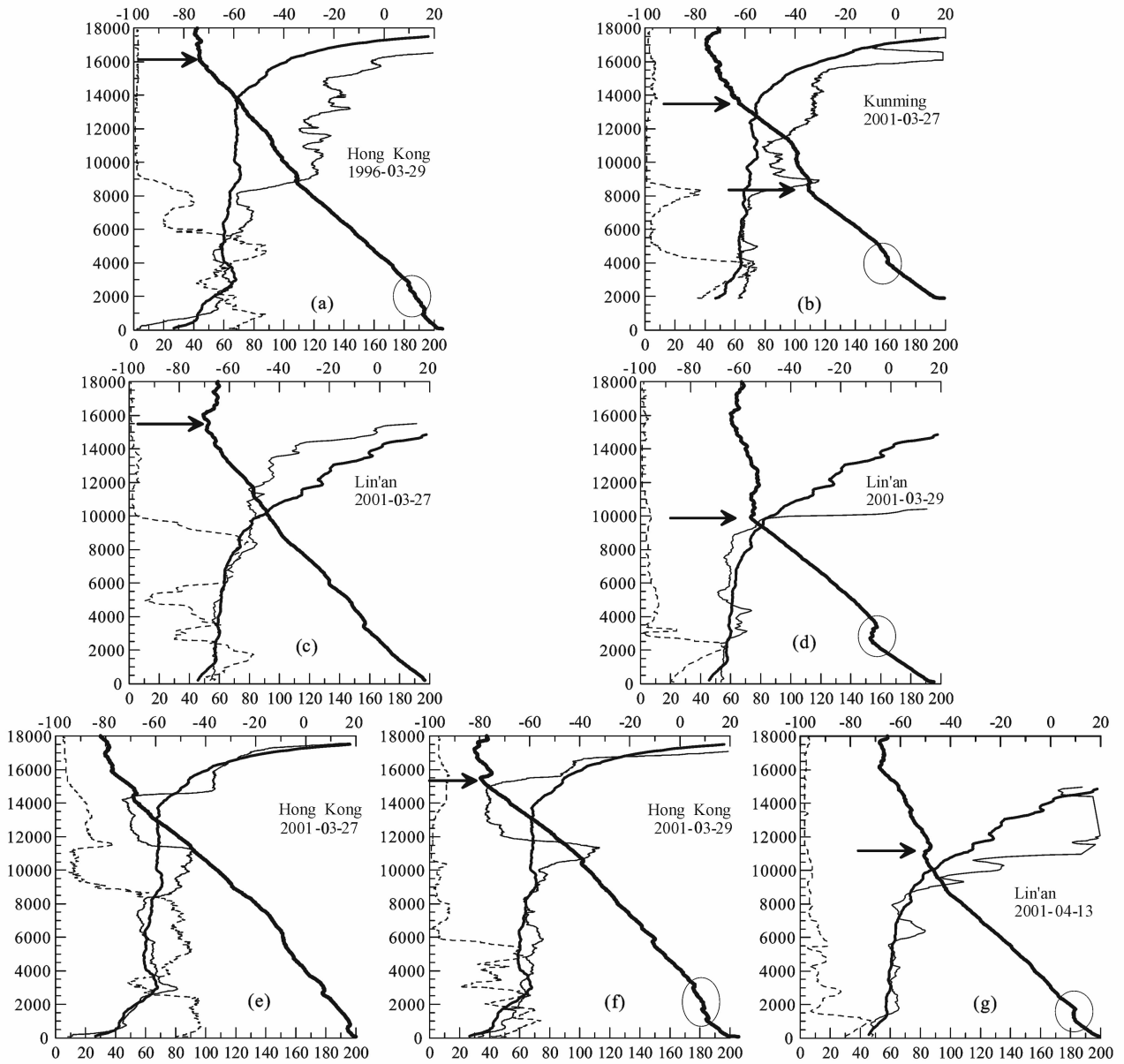


图 1 臭氧浓度、相对湿度与温度垂直分布廓线

(细实线为臭氧廓线,单位 ppbv^1),最粗实线为温度廓线,单位 $^{\circ}\text{C}$,划线为相对湿度廓线,单位%;较粗实线为平均的臭氧体积混合比浓度廓线,单位 ppbv ,底部横轴为臭氧体积混合比浓度和相对湿度,顶部横轴为温度;纵轴为高度,单位 gpm ,圆圈指示对流层中下层锋面,粗箭头指示热力对流层顶)

(a) 1996年3月29日香港;(b)2001年3月27日昆明;(c)2001年3月27日临安;(d)2001年3月29日临安;(e)2001年3月27日香港;(f)2001年3月29日香港;(g)2001年4月13日临安.

Fig. 1 Profiles of ozone, temperature and relative humidity for 06 UTC

(Ozone is thin solid line and unit ppbv , temperature is the thickest solid line and unit $^{\circ}\text{C}$, relative humidity is dashed line and unit %, and the averaged ozone is thicker solid line and unit ppbv . The bottom abscissa denotes relative humidity and volume mixing ratio of ozone and the top is temperature, and the ordinate is height (unit: geopotential meter). The circle denotes the front in the lower- and mid-troposphere, and the thick arrow denotes the thermal tropopause)

(a) Hong Kong, 29 March 1996;(b) Kunming, 27 March 2001;(c) Lin'an, 27 March 2001;(d) Lin'an, 29 March 2001;(e) Hong Kong, 27 March 2001;(f) Hong Kong, 29 March 2001;(g) Lin'an, 13 April 2001.

1) 臭氧体积混合比浓度单位, $1 \text{ ppbv} = 1 \times 10^{-9}$

3.2 臭氧垂直分布的多尺度变化特征

地球大气在垂直方向表现为分层分布,具有层结的特点^[16].图1表明,臭氧的垂直分布也具有层结分布的特征^[9],除了在大尺度上平流层与对流层中臭氧分布特征不同,在较小的尺度上臭氧的垂直分布廓线交替出现多个极小与极大值.在本文所关注的对流层的中上层,图1(a,b,g)中在超过平均值的高浓度臭氧分布中出现多个极小值分布;在图1(c,e,f)中较普遍低于平均值的低浓度臭氧分布中又表现为多个极大值分布,这些极大臭氧浓度值又高于平均值.

从图1中的对流层中上层臭氧分布来看,整个对流层中上层的臭氧变化是非常复杂的,表现为多种尺度的变化特征.对流层中上层的臭氧浓度的变化不仅受到大气大尺度运动的影响,也可能受到大气中小尺度运动的影响.在下文中对与此有关的大气运动特征进行分析.

3.3 天气概况

春季是寒潮与强冷空气活动频繁的季节^[17].1996年3月25~31日南支槽东移加强和北方冷空气扩散南下^[18];2001年3月27~29日有强冷空气南下过程^[19];2001年4月11~12日我国大部地区气温先后下降了7~13℃^[20].上述表明本文这几个臭氧探测个例是与春季的冷空气活动联系在一起的.

3.4 气柱臭氧总量及对流层顶高度的演变

TOMS观测的气柱臭氧总量的极大值和极小值分布与500 hPa和200 hPa的槽、脊有很好的相关关系^[21,22].NCEP 1°×1°的最终分析资料具有气柱臭氧总量及对流层顶高度这两个与对流层中上层臭氧变化关系非常密切的变量,因此我们对2001年的个例分析了气柱臭氧总量及对流层顶高度与其月平均值的差异.

对2001年3月平均气柱臭氧总量与27日、29日气柱臭氧总量与3月平均值的偏差(图略)进行分析发现,27与29日临安、昆明、香港三地的气柱臭氧总量都有不同程度的增加.

分析2001年3月平均对流层顶高度与27日、29日对流层顶高度与3月平均值的偏差(图略)结果表明,与图1中温度廓线的分布特征相对应,27与29日临安、昆明、香港三地的对流层顶高度都有不同程度的降低.需要指出的是,在3月份平均对流层顶高度等值线图,在30°N附近有一个等值线密集带,这个地区就是副热带地区的对流层顶断裂带.

从以上分析可以看到,较低的对流层顶对应于

较高的气柱臭氧总量,同时也对应于较高的对流层中上层臭氧浓度,这些特征都是与3.3节中指出的冷空气活动相联系的.对于2001年3月29日香港虽然气柱臭氧总量增加、对流层顶降低,但在12~17 km高度却出现了较低浓度的臭氧分布.这从另一个侧面说明了大气运动与臭氧浓度变化的复杂性,具体参见下文的位涡与后向轨迹分析.

4 卫星水汽图像、急流与位势涡度分布

4.1 GMS-5 水汽图像的演变

使用卫星水汽图像和等熵面位势涡度可以说明平流层空气侵入对流层的结构^[15,23].威尔顿和哈默斯^[24]指出,在6.7 μm的水汽图上出现的变暗过程意味着存在活跃的下沉运动.因此我们使用GMS-5水汽图像(见图2)及其演变来确定对流层上部的下沉区和对流层中部气流以及大气中的多尺度运动特征.图2表明,多个对流层中上层臭氧浓度明显增加4个个例(图1a,1b,1d,1g)都对应于水汽图像上的暗区或者干缝,这表明有平流层的空气侵入对流层中^[22];同时,在暗区的南侧有明显的急流边界存在^[24],也就是说这些暗区是与高空副热带急流联系在一起^[15].

但是本文中4个个例相联系的天气系统形态各有不同.在图2a水汽图像上,有一从45°N伸展到15°N的巨大S型暗区存在,在香港以北35°N附近存在一高空低涡(见图3a),高空低涡的低层为锢囚的气旋(天气图未给出,见图5a垂直剖面低层的冷堆).图2b水汽图像上我国西南地区以及中南半岛地区有大片暗区存在,但在大片暗区中又有较小尺度的水汽羽存在,特别在临安上空出现了一片较小尺度的大约100 km左右宽度的较亮的水汽羽,这片水汽羽可能与高空锋前的暖湿空气向上爬升有关(见图5d的垂直剖面),从而表现出大气运动的多尺度特征.在300 hPa天气图(见图3b)上,昆明位于南支槽区,临安位于北支低压横槽槽前.在2001年3月29日06 UTC水汽图像(见图2c)上,临安与香港处在了一个巨大的斧型暗区中,但临安的水汽图像亮度明显低于香港地区.在300 hPa天气图(见图3c)上,2001年3月27日的南支槽与北支槽在2001年3月29日结合为巨大的低压槽区,临安与香港都位于低压槽内.而在图2d中水汽图像临安上空的干缝或者暗区则是一条与位于日本以北的气旋相联系的干气流^[15],在300 hPa天气图上(见图3d)临安位于低压横槽的槽前区域.

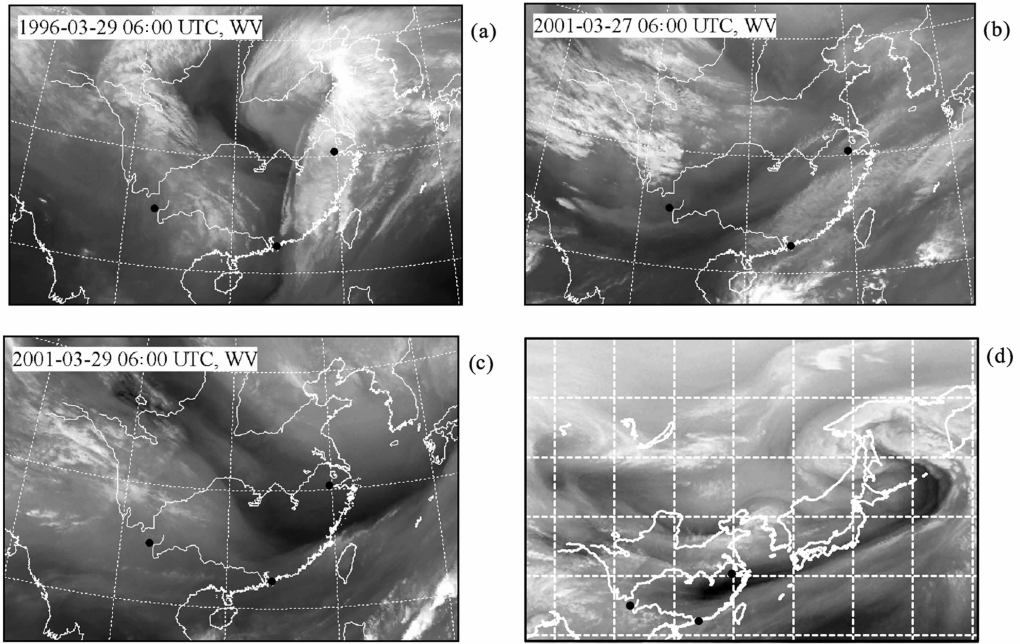


图 2 06 UTC GMS-5 地球静止卫星水汽图像

(图中黑色圆点为三个臭氧探测地点的位置,自西向东依次为昆明、香港、临安)

(a)1996年3月29日;(b)2001年3月27日;(c)2001年3月29日;(d)2001年4月13日.

Fig. 2 Water vapor imageries of GMS-5 for 06 UTC

(Black dots denote Lin'an, Kunming and Hong Kong respectively)

(a)29 March 1996; (b)27 March 2001; (c)29 March 2001; (d)13 April 2001.

从水汽图像的演变来看(图未给出),2001年3月25日到27日,在喜马拉雅山的西南有暗黑色区域不断发展并向东移动,导致在水汽图像上的昆明地区不断变暗,表明下沉运动是在一直发展中的^[23].到27日06 UTC,昆明地区明显变暗.在这段时间内,临安与香港没有出现明显的变暗过程,但在27日06 UTC,临安和香港地区各位于一个色调较昆明地区亮的水汽图像区域内.到3月29日06 UTC,在水汽图像上,临安与香港上空形成一个巨大的斧型暗区(图2c).从3月28日00 UTC到29日06 UTC GMS-5水汽图像的演变(图未给出)位于西北的两条暗缝一直向东南移动,直到29日06 UTC发展为一个巨大的斧型暗区.1996年3月29日香港与2001年4月13日临安个例中臭氧探测地点也有如上述所分析的变暗过程.

总之通过观察这几个个例 GMS-5 水汽图像的特征及其演变过程,我们可以发现,在1996年3月29日香港、2001年3月27日06 UTC昆明和29日06 UTC临安、2001年4月13日临安有明显的平流层空气侵入对流层过程发生,这导致了这几次探测

过程中对流层中上层的臭氧浓度明显升高.2001年3月香港地区个例的水汽图像的变化过程不如1996年香港与2001年临安与昆明两地的个例明显.

值得注意的是,2001年3月27日06 UTC水汽图像上临安地区较突出地表现出大气多尺度运动的特征,这与同一时刻该地探测的臭氧垂直廓线分布特征(见图1c,对流层上层10~16 km臭氧浓度偏低,8~10 km臭氧浓度升高)密切相关.这种中尺度的水汽羽可能与高空锋前的向上爬升暖湿空气有关(见图5d的垂直剖面).

4.2 高空急流的演变

由于副热带急流与高空锋区密切联系在一起,高空锋区是对流层和平流层之间显著的质量交换区^[25],因此副热带急流的变化对对流层臭氧浓度的变化有着重要的影响.图3表明在300 hPa等压面上,亚洲大陆上空明显存在着两支急流系统,一支北支极锋急流;另一支为副热带急流,两支急流在中国大陆东部或者日本、朝鲜半岛上空汇合为一支宽广的急流系统.在仔细观察图1a,1b,1d,1g中对流层中上层臭氧浓度增加个例探测地点在图3的300 hPa

流场上位置可以发现,1996年3月29日香港、2001年3月27日昆明、2001年3月29日临安和2001年4月13日临安都位于高空急流入口区的左侧,根据急流动力学,该区域高空存在较强的下沉运动^[25];而对于对流层中上层臭氧浓度较低的个例(图1c, 1e, 1f),2001年3月27日临安则位于急流出口区的左侧,27、29日的香港位于急流入口区的右侧,这些区域高空存在上升运动^[25].

从2001年3月25日到29日,随着高空低涡向东南的移动,汇合后的高空急流也在向南方移动,并且中心风速不断增强.从图4b与4c还可以看到,临安位于两支急流的汇合处,昆明的上空为副热带急流区,香港位于副热带急流区的南侧.由于副热带急流的南北摆动,昆明在副热带急流中的位置也在变化,27日06 UTC在副热带急流的北侧.同时,影响三地的大气环流系统也是不同的,临安地区为西南气流,随着南支槽的向东移动昆明由西风气流转变为西北风,香港为西风或者西南风气流.从3月25日到29日这段时间,副热带急流地理位置的南北移动,直接影响了临安、昆明和香港三地的次级环流分布^[17,25],必然会改变三地对流层上层的臭氧分布.

2001年3月27~29日,在150 hPa等压面上只表现为一支副热带急流系统(图略),其位置相对稳定,但在27日和29日的位置比25日稍微偏南,并且强度增强.在此等压面上,临安与昆明地区主要受西风影响,值得注意的是,150 hPa等压面上香港在3月25~29日这段时间内都受西南风的影响,这与3月27日和29日香港上空150 hPa(大约14 km高度)高度的低臭氧浓度区是相对应的,我们将在第5节给出香港150 hPa的后向轨迹分析.

4.3 高层等压面位势涡度的演变

高层等压面位势涡度分布的变化能够从另一个侧面证明平流层空气侵入对流层造成气柱臭氧总量的增加^[23].其主要原理是根据绝热无摩擦大气运动位势涡度守恒,在极地平流层是高位势涡度的源区,因此对流层的位势涡度高值区表示有平流层空气侵入对流层.图4给出了1996年3月29日、2001年3月27日与29日、2001年4月13日06 UTC的300 hPa PV分布.通过对比气柱臭氧总量分布图(图未给出)与图4发现较高的PV区域(≥ 1 PVU)对应于较高的气柱臭氧总量,通过这种对比,我们可以排除人类活动因素造成对流层上层臭氧浓度增加^[7].通过对比水汽图像(见图2)与300 hPa PV分布,高PV地区基本对应于水汽图像的暗区,但二者有所

差别,比如,27日昆明地区300 hPa的PV值 >1 PVU对应于水汽图像的暗区,但在同日的临安地区虽然PV值 >1 PVU但对应于水汽图像的水汽羽,这种对应关系表明在对流层中上层的大气中既有大尺度运动也存在中小尺度的运动,从而使得对流层中上层的臭氧浓度出现不同的分布特征.

1996年3月29日06 UTC 300 hPa的位势涡度分布图(见图4a)上,有一个向南伸展的舌状高PV区存在,香港地区的PV值大于1.5 PVU,因此较高的位势涡度对应于较高的臭氧浓度,该高PV区是与北方切断低压向南伸展的南支槽相对应(见图3a).2001年3月27日06 UTC 300 hPa PV向南伸展的舌状高值区一直向西南延伸到了昆明地区,昆明地区的300 hPa PV超过了1 PVU,这与同时观测到的对流层上层的高浓度臭氧相对应;临安地区300 hPa PV由27日的大约1 PVU增加到了29日的大约1.5 PVU;香港由于纬度较低,其300 hPa PV都小于1 PVU,但是29日06 UTC 300 hPa PV向南伸展的舌状高值区一直延伸到了香港地区.同时,我们也注意到,2001年3月27日与29日这两个舌状高PV区的分布也是与对流层中上层的南支槽相对应的(见图3b与3c).2001年4月13日个例300 hPa的PV分布(图4d)类似于3月27日的分布(图4b),但在临安上空有比27日更高的PV值.

4.4 垂直剖面上高空急流和位势涡度的演变

冷空气活动导致的大气环流和高空急流的变化,必然导致与高空急流相联系的次级环流的变化^[17,25].图5给出了利用NCEP分析资料绘制的沿臭氧探测地点所在经线的垂直剖面图,除了风速与PV分布外,在图中还给出了温度与位温的垂直分布.通过垂直剖面等温线的折角与等位温线的密集带可以判断对流层中锋区的位置,对流层中上层等位温线的密集带还可以用来判断对流层顶的位置.此外,由于在干绝热状态下气块运动过程中位温守恒,并且对流层中上层大气运动无水汽凝结条件下满足干绝热假设,因此在对流层中上层等位温线可以近似看作大气大尺度运动的流线,可用于辅助判断对流层中层高浓度臭氧空气的来源.

需要说明的是,对流层顶的确定方法有热力学和动力学两种.热力学对流层顶可以根据等位温线的垂直梯度来确定^[17].动力学对流层顶是通过确定位势涡度阈值来定义对流层顶,一般以2 PVU(或者1.5 PVU)的等值线来定义动力学对流层顶^[26].因此我们在图5中分别标注了热力学对流层顶(图5

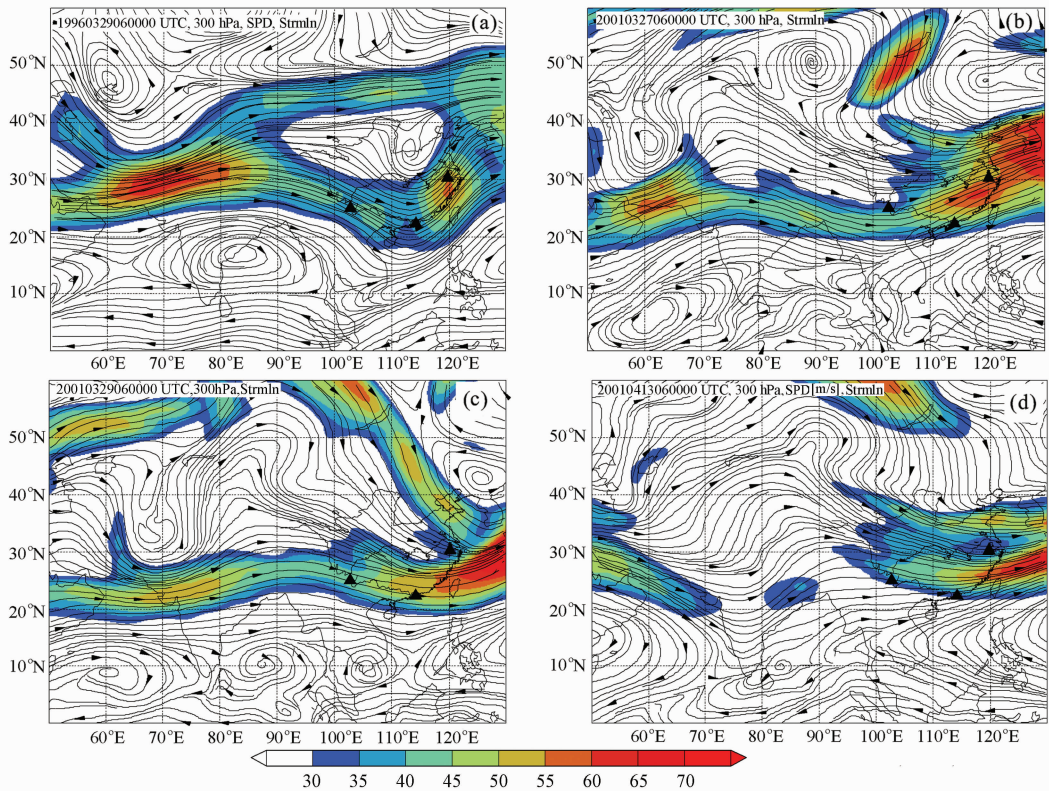


图3 06 UTC 300 hPa 流场(细实线)和风速场(彩色填充区)

(黑色三角为三个臭氧探测地点,其中风速单位为 m/s)

(a)1996年3月29日;(b)2001年3月27日;(c)2001年3月29日;(d)2001年4月13日.

Fig 3 Isotach (color shaded) and streamline (thin solid line) of 300 hPa for 06 UTC

(Black triangles denote the ozone sounding sites, and the unit of wind speed is m/s)

(a)29 March 1996; (b) 27 March 2001; (c) 29 March 2001; (d) 13 April 2001.

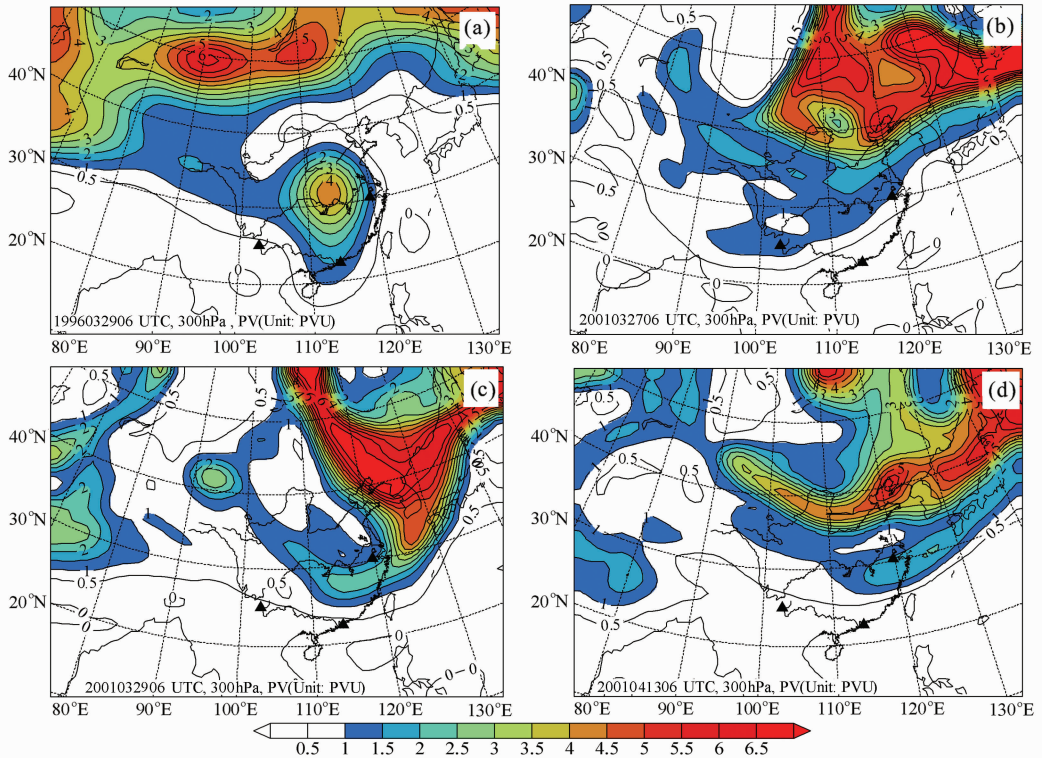


图4 06 UTC 300 hPa PV 分布

(黑色三角为三个臭氧探测地点,彩色填充区为 PV 大于 1 PVU 的区域,PV 单位:PVU;间隔为 0.5 PVU)

(a)1996年3月29日;(b)2001年3月27日;(c)2001年3月29日;(d)2001年4月13日.

Fig. 4 Potential vorticity of 300 hPa for 06 UTC (black triangles denote Lin'an, Kunming and Hong Kong respectively, color shaded ≥ 1 PVU, and the PV unit is PVU and contour interval 0.5 PVU)

(a)29 March 1996; (b) 27 March 2001; (c) 29 March 2001; (d) 13 April 2001.

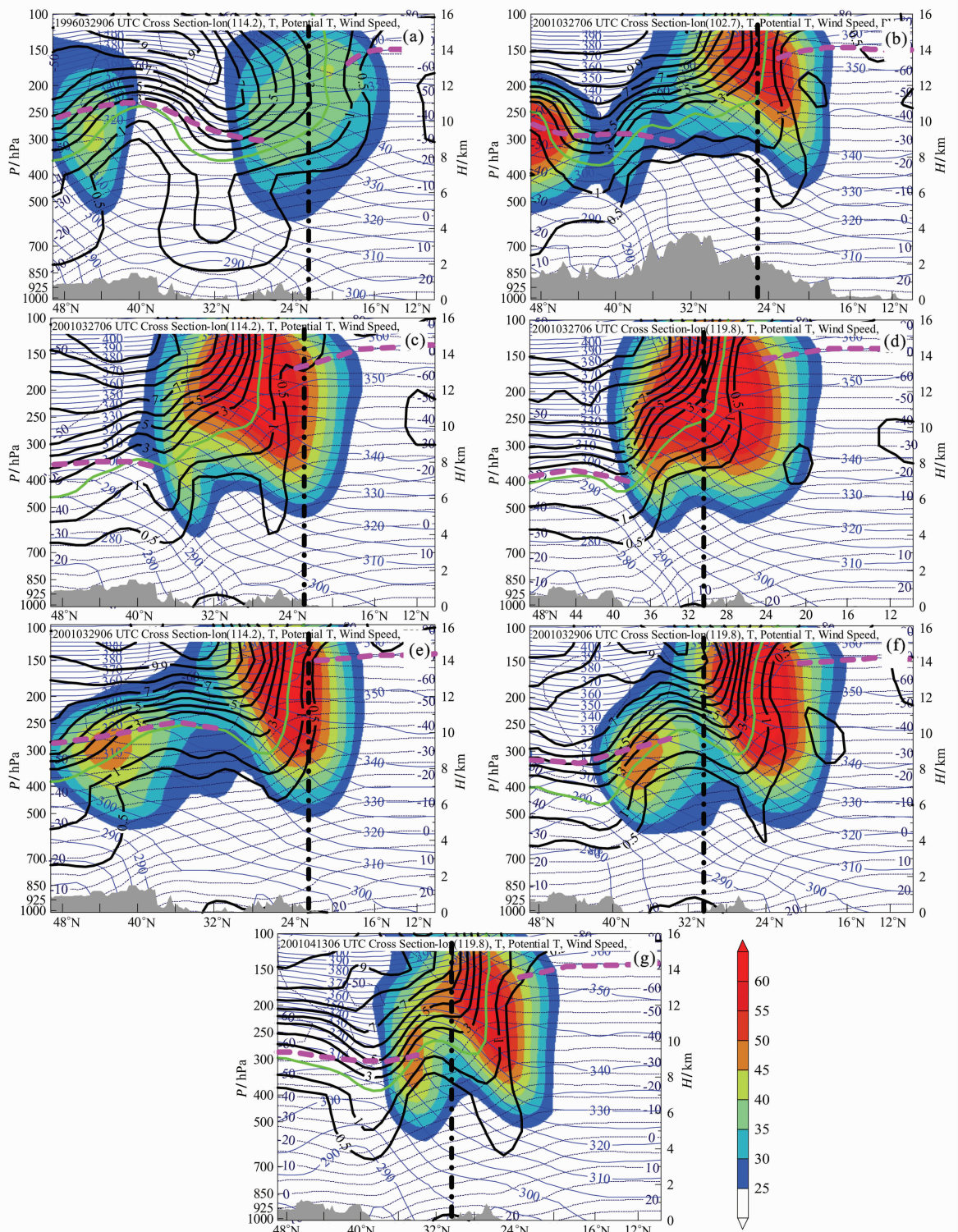


图 5 通过臭氧探测地点的 06 UTC 经线垂直剖面

(温度深蓝色细划线, 间隔 5°C , 单位 $^{\circ}\text{C}$; 位温蓝色细实线, 间隔 5K , 单位 K ; 位势涡度黑色粗实线, 间隔 1PVU , 增加 0.5PVU 等值线, 2PVU 绿色等值线代表动力对流层顶, 单位 PVU ; $\geq 25\text{ m/s}$ 风速彩色填充区, 单位 m/s ; 黑色粗虚线表示臭氧探测地点; 紫红色粗划线代表热力对流层顶; 灰色填充区为地势)

(a) 香港, 1996 年 3 月 29 日沿 114.2°E ; (b) 昆明, 2001 年 3 月 27 日沿 102.7°E ; (c) 香港, 2001 年 3 月 27 日沿 114.2°E ; (d) 临安, 2001 年 3 月 27 日沿 119.8°E ; (e) 香港, 2001 年 3 月 29 日沿 114.2°E ; (f) 临安, 2001 年 3 月 29 日沿 119.8°E ; (g) 临安, 2001 年 4 月 13 日沿 119.8°E .

Fig. 5 Cross sections along the longitude of ozone sounding for 06 UTC

(Black thick dot-dashed lines denote Lin'an, Kunming and Hong Kong respectively. Deep blue thin dashed line is temperature at interval 5°C and unit $^{\circ}\text{C}$; blue thin solid line is potential temperature at interval 5K and unit K ; black thick solid line is potential vorticity at interval 1PVU and unit PVU , the 0.5PVU isolines of potential vorticity were added, and 2PVU isolines of potential vorticity denote dynamic tropopause. The color shaded areas denote the wind $\geq 25\text{ m/s}$ and unit is m/s ; magenta lines denote thermal tropopause and the gray shaded area denotes topography)

(a) Hong Kong, along 114.2°E , 29 March 1996; (b) Kunming, along 102.7°E , 27 March 2001; (c) Hong Kong, along 114.2°E , 27 March 2001; (d) Lin'an, along 119.8°E , 27 March 2001; (e) Hong Kong, along 114.2°E , 29 March 2001; (f) Lin'an, along 119.8°E , 29 March 2001; (g) Lin'an, along 119.8°E , 13 April 2001.

中的紫红色粗划线)与动力学对流层顶(图 5 中绿色的 2 PVU 等值线)。

图 5 中所有剖面的突出特征表现为对流层中上层的高空急流、副热带锋区、舌状下垂的高位涡区以及对流层中下层的冷空气活动(冷空气活动见 3.2 节)。下面就每一个例进行具体分析。

图 5a 为 1996 年 3 月 29 日 06 UTC 在香港对流层中上层观测到高浓度的臭氧分布个例(见图 1a)。在图 1a 中,香港上空 8~16 km 高度臭氧浓度增加,5~8 km 高度臭氧浓度增幅较小。对比图 5a 中等位温线分布,香港上空从 500~250 hPa(大约 5.5~10.8 km)处于高空副热带锋区内,该区域为中纬度热力对流层顶与热带热力对流层顶的断裂处,从 250~100 hPa 香港进入等位温线密集的平流层。从等温线分布来看,香港上空等温线折角不大说明大气斜压性较弱,与其相对应的是高空急流的风速较小,极大值约为 45 m/s。从 PV 的分布来看,香港上空 350~100 hPa(约 8.5~16 km)为舌状下垂高 PV 区域,对应于较高的臭氧浓度。在对流层中层(500~350 hPa)虽然 PV 值较小,但位于对流层顶断裂处,香港又处于急流入口区的左侧(见图 3a)有下沉运动,因此有来自中纬度地区平流层的高浓度臭氧沿等位温线向香港上空的对流层中层输送,使得该地区对流层中层的臭氧浓度也有所升高(见图 1a)。

图 5b 为 2001 年 3 月 27 日 06 UTC 在昆明对流层中上层观测到高浓度的臭氧分布个例(见图 1b)。同图 5a 比较,该个例昆明上空急流强度明显强于 1996 年香港个例(见图 5a),在对流层中上层等温线折角明显、等位温线密集,大气斜压性较强,对流层中上层 PV 的分布与 1996 年香港个例类似。

图 5c 为 2001 年 3 月 27 日 06 UTC 香港个例,该个例在对流层 8~12 km 高度观测到较高浓度的臭氧分布,在 12~15 km 高度臭氧浓度低于平均值(见图 1e)。该个例的副热带锋区、高空急流、高 PV 分布均位于香港地区以北,因此 12~15 km 高度位于急流入口区的右侧有上升运动,并且在该高度水平风向为西南风(见 4.2 节的分析),有来自热带的空气团导致臭氧浓度较低,我们将在后文对其进行轨迹分析。不过 15~16 km 高度臭氧浓度却明显升高,其原因还不太清楚,可能与空气团进入平流层有关。此外,在对流层中层 350~200 hPa(大约 8.5~12 km 高度)倾斜的等位温线以及香港北侧急流入口区左侧的下沉运动表明有来自平流层的臭氧下沉到香港地区使得该地区 8~12 km 高度臭氧浓度升高。

图 5d 为 2001 年 3 月 27 日 06 UTC 临安个例,该个例在对流层 6~10 km 高度观测到较高浓度的臭氧分布,在 10~18 km 高度臭氧浓度低于平均值(见图 1c)。虽然临安上空具有与图 5a 类似的温度、位温、风速、PV 分布,但该个例不同于其他对流层中上层臭氧浓度升高的个例。在 4.1 节对该个例卫星水汽图像的分析中临安上空表现为中尺度的水汽羽,因此该个例表明大气中多种尺度运动对对流层中上层的臭氧分布具有非常重要的影响。

图 5e 为 2001 年 3 月 29 日 06 UTC 香港个例,该个例类似该月 27 日的香港个例,但在对流层中层的 4~12 km 高度臭氧浓度明显增加,高于平均值(见图 1f)。该个例较 27 日冷空气明显向南推进,相应的副热带锋区、高空急流、高 PV 分布也更偏南,但香港仍在这些对流层中上层天气系统的南侧。该个例香港对流层中层臭氧浓度明显增加表明倾斜的等位温线以及急流入口区左侧的下沉运动使得更多的平流层臭氧被输送到该地区。

图 5f 为 2001 年 3 月 29 日 06 UTC 临安个例,该个例中 10 km 以上高度臭氧浓度急剧增加表现为平流层臭氧分布的特征(见 3.1 节与图 1d)。从图 5f 中可以看到,副热带高空急流、副热带锋、舌状下垂高位涡区都位于临安南侧,临安上空 250 hPa(大约 10.8 km)以上呈现出平流层的位温、位涡分布特征。

图 5g 为 2001 年 4 月 13 日 06 UTC 临安对流层 10~16 km 臭氧浓度增高(见图 1g)个例,该个例的垂直剖面分布特征与图 5b 非常类似。

通过以上对各个个例沿经线垂直剖面上的急流、高空锋区以及位势涡度的分析,可以看到,1996 年 3 月 29 日香港、2001 年 3 月 27 日昆明、3 月 29 日与 4 月 13 日临安 8~16 km 的高浓度臭氧的来源是平流层。但对于 2001 年 3 月 27 日临安个例虽然对流层中上层具有较高的 PV 分布但臭氧浓度并不高,这表明通过卫星水汽图像表现出来的中尺度的水汽羽对臭氧的垂直分布具有重要影响。

香港对流层上层 PV 在 2001 年 3 月 29 日比 27 日(见图 5c 和 5e)有很明显增大,但香港不同于临安与昆明,因其纬度较低(22.3°N),其 PV 值要比临安与昆明低。Gouget 等^[4]指出,在副热带地区使用 0.5 PVU 和 0.75 PVU 的等值线就可以表示平流层-对流层空气交换所具有的高位涡下垂状特征。在 3 月 27 日香港上空的位涡分布中(图 5c),我们可以看到,香港上空只有 150~100 hPa 的位涡大于 0.5 PVU;到 29 日,位涡增大,但也只有 300~100 hPa 的位涡

介于 0.5~1 PVU 之间. 由图 1e, 1f 可知, 2001 年 3 月 27 日与 29 日香港的臭氧垂直分布与临安、昆明的分布特点不同, 其主要特征是, 12~15 km 高度有一低浓度臭氧区, 另在 8~12 km 和 15~16 km 高度有较高浓度的臭氧分布. 通过比较香港上空的位势涡度和臭氧浓度垂直分布, 可以发现并不能简单地用位涡, 即平流层-对流层交换, 来解释 3 月 27 日和 29 日香港的臭氧浓度垂直分布特征, 但是香港的 15~16 km 高度较高浓度臭氧分布还是与较高的位涡有比较好的对应关系.

5 临安、昆明和香港三地对流层上层空气块后向轨迹分析

考虑到冷空气活动过程中对流层中上层大气大

尺度运动的特点, 使用 NCEP 1°×1°分析资料与 PC-Vis5D 软件^[27]追踪对流层中上层气块的大尺度的后向轨迹来分析 2001 年 3 月 27~29 日这段时间临安、昆明和香港三地对流层中上层空气的来源.

图 6 给出了 2001 年 3 月 27、29 日 06 UTC 临安、昆明和香港三地的后向轨迹. 从图上可以看到, 3 月 27、29 日 06 UTC 临安上空 150、200、300 hPa (限于篇幅, 到达临安 200、300 hPa 的轨迹图未给出) 空气都是随着西风气流从西方下沉而来; 香港上空 300 hPa 空气也是随着西风气流从西方下沉而来, 但 150 hPa 空气却是来自热带海洋地区, 不同于 300 hPa 的轨迹; 3 月 27 日 06 UTC 昆明 200 hPa 的空气类似于临安, 也是随着西风气流从西方下沉而来.

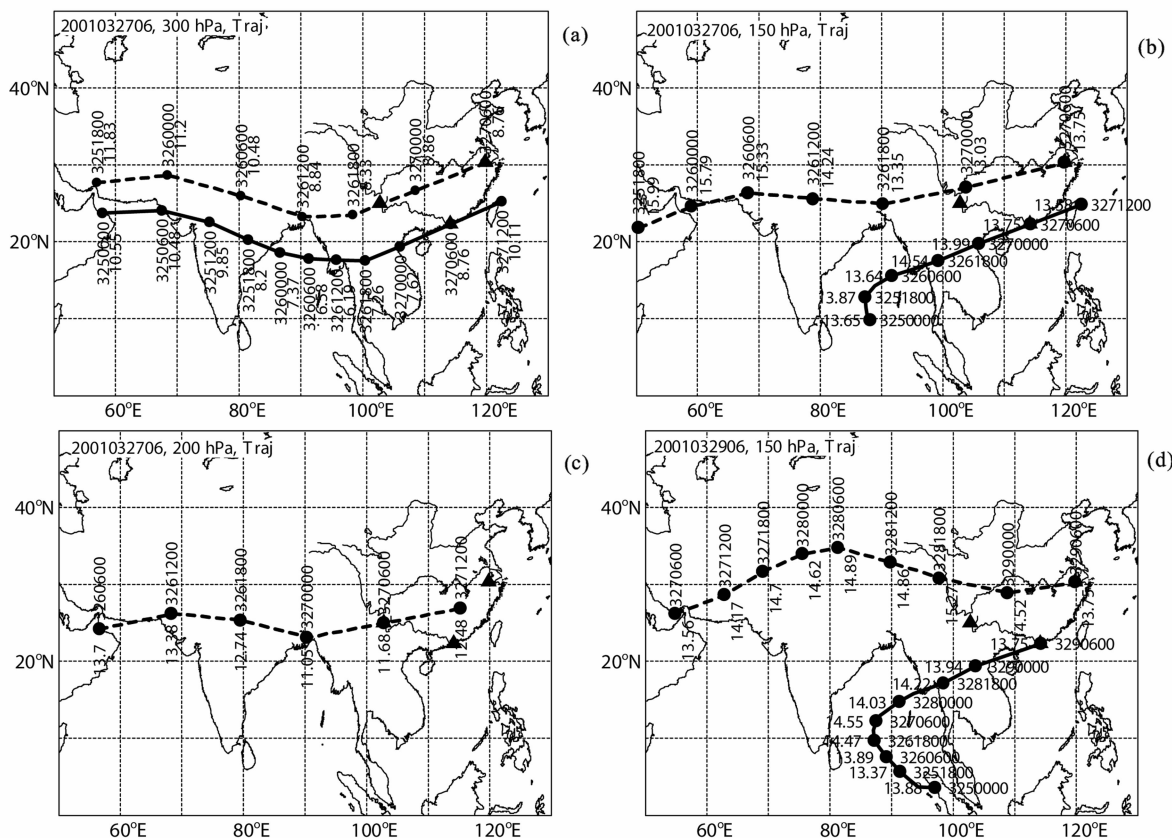


图 6 2001 年 3 月 27、29 日 06 UTC 临安、昆明和香港三地的后向轨迹
(黑色三角为三个臭氧探测地点, 其中, 7 位数字为日期时间, 格式为月日时分, 如 3290600 代表 2001 年 3 月 29 日 06 UTC 00 分; 其他数字为轨迹点所在高度, 单位 km)

(a) 2001 年 3 月 27 日 06 UTC 分别到达临安、香港 300 hPa 的轨迹; (b) 同 (a), 但到达高度为 150 hPa;
(c) 同 (a), 但到达昆明 300 hPa 的轨迹; (d) 同 (b), 但为 2001 年 3 月 29 日 06 UTC.

Fig. 6 Back air trajectories for Lin'an, Kunming and Hong Kong

(Black triangles denote Lin'an, Kunming and Hong Kong respectively. Numbers of seven digits denote date, which format is month-day-hour-minute, for example, 3290600 denotes 06:00 UTC 29 March 2001; other numbers denote altitudes above MSL of air parcels, unit: km)

(a) Arrived at 300 hPa of Lin'an and Hong Kong at 06 UTC 27 March 2001; (b) same as (a), but arrived at 150 hPa; (c) same as (a), but arrived at 300 hPa of Kunming; (d) same as (b), but for 06 UTC 29 March 2001.

2001年3月27、29日06 UTC香港上空150 hPa(大约14 km高度)来自热带海洋地区(见图6b, 6d),对应于较低香港上空低浓度臭氧分布,这种结果与Liu^[28]、Chan等^[29]的研究结果类似,这与春季影响香港的哈德莱环流上升支的变化有关^[28,29]。

下面讨论临安和昆明空气轨迹所经过路径的PV分布。根据前面的分析较高的臭氧分布对应于较高的位势涡度,并据Gidel等人的研究成果在6 km以上的自由大气中臭氧垂直分布与位势涡度基本为线性关系^[30],因此可以通过研究轨迹所经过地区的PV大小来确定轨迹经过地区臭氧浓度的高低。限于文章篇幅,没有给出轨迹经过经线垂直剖面的PV分布。

轨迹经过经线垂直剖面的PV分布表明,2001年3月27日06 UTC到达昆明200 hPa的空气块在3月26日18 UTC所经过地区的PV值大约为1.5 PVU左右,而3月27日06 UTC昆明上空200 hPa的PV值也为1.5 PVU左右(见图5b),二者大小相差不大。此外同3月27日06 UTC沿经过昆明的经线垂直剖面类似(见图5b),在3月26日18 UTC轨迹所经过经线的垂直剖面上也有一个向下伸展的舌状高PV区存在,这说明在轨迹经过的地区有动力对流层顶折叠现象^[6]发生,特别是轨迹就从高PV的舌状区附近经过。

2001年3月27日06 UTC到达临安300 hPa与150 hPa的空气块在3月26日18 UTC所经过经线的垂直剖面上也有一个向下伸展的舌状高PV区存在,这说明在轨迹经过的地区也有动力对流层顶折叠现象发生。3月29日06 UTC到达临安200 hPa与150 hPa的空气块在3月28日12 UTC所经过经线的垂直剖面上有更高的PV值,这也是与3月29日06 UTC临安10 km以上高度有着很高浓度的臭氧相对应的。

需要指出的是,虽然2001年3月27日06 UTC到达临安300 hPa与150 hPa大尺度运动的轨迹显示空气块经过区域以及临安上空都有较高的PV分布,但由于卫星水汽图像表明的中尺度水汽羽使得该个例中临安上空10~18 km高度臭氧浓度低于平均值,并没有出现明显的臭氧浓度升高现象。

6 结论与讨论

本文通过分析气柱臭氧总量与对流层顶高度的演变、GMS-5水汽图像的演变、大气环流系统、垂直

剖面上高空急流和位势涡度的演变以及空气块的后向轨迹对1996年3月29日香港2001年3月27~29日的临安、昆明、香港地区与4月13日临安臭氧探测个例中对流层中上层臭氧来源进行了详细的分析,结果表明,1996年3月29日香港与2001年3月27日昆明、3月29日临安与4月13日临安4个个例对流层中上层虽然有不同的形态分布但都具有较高的臭氧浓度,这些个例的共同特征是:1)在水汽图像上,在臭氧探测地点的上空都有干缝或者暗区存在(见图2);2)在300 hPa流场图上,臭氧探测地点都位于急流轴入口区的左侧(见图3),急流左侧的风场具有气旋性切变特征,该处为下沉运动区;3)300 hPa的位势涡度分布图上,都有一个向南伸展的舌状高PV区存在(见图4),并且高位涡对应于较高的臭氧浓度(见图1a, 1b, 1d, 1g);4)温度场上,对流层上层都有副热带锋存在,中下层有冷锋存在(由于地处高原,昆明除外)(见图5);5)沿经线垂直剖面的PV分布,都有向下伸展的舌状高PV区存在(见图5)。通过这些相同特征的分析可知,这4个个例中对流层中上层高浓度的臭氧来自于平流层,其侵入对流层的机制就是热力学对流层顶的断裂或者动力学对流层顶的折叠。

根据以上对流层中上层臭氧浓度增高个例气象要素场的共同特征,可以得到判断春季中国南部地区对流层中上层臭氧浓度增加区域的充分条件为根据卫星水汽图像上的暗区、高空急流入口区的左侧辐合区、高空锋区、对流层中上层 ≥ 1 PVU的向下伸展的舌状高位涡区来综合判断。需要指出的是,这些条件只是对流层中上层臭氧浓度增加的充分条件而非必要条件。

这4个个例也表明,与副热带急流相联系的热力学对流层顶断裂或者动力学对流层顶的折叠不仅发生在中高纬度地区(本文中的临安地区),它也能发生于纬度较低的昆明(25.03°N)与香港地区(22.3°N)。根据本文的分析结果可以推断,随着冷气团的南下,受到冷空气影响地区,特别是卫星水汽图像的暗区、高空急流入口区的左侧辐合区、高空锋区、高PV地区的对流层中上层臭氧浓度都会有不同程度的增加。由于低纬地区的地面锋活动次数可以表征冷空气侵入到低纬地区的情况,文献^[31]统计的东亚气候锋的分布表明在冬季与春季冷空气可以向南推进到海南岛以南的更低纬度的地区,因此本文根据香港个例研究的结果说明较低纬度地区出现平流层空气侵入对流层并非是特殊个例,而具有一定的代表性。

需要指出的是,不仅图 1 中臭氧廓线交错出现多个极小与极大值表明臭氧垂直分布的多尺度变化特征,而且 2001 年 3 月 27 日临安个例的分析也表明对流层中上层臭氧垂直分布状态不仅受到大气大尺度运动(虽然 PV 较高但臭氧浓度较低,见图 5d)的影响,而且也会受到大气的中小尺度运动的影响,图 2b 的卫星水汽图像特征清楚地表明了这一点,因此,在今后的臭氧研究中可能更需要较高水平分辨率的卫星观测资料以及较高水平与垂直分辨率的中尺度气象模式来辅助分析臭氧的垂直分布变化特征。

2001 年 3 月 27、29 日香港上空 15~18 km 的臭氧浓度增加原因与临安和昆明类似,也是来自平流层,但其 12~14 km 的低浓度臭氧空气是来自臭氧浓度很低的热带海洋地区,其 10~12 km 的高浓度臭氧空气则来自香港上风方的大陆地区. 这表明春季 3 月香港地区位于中纬度气团与热带海洋气团的交互影响地带,其上空的臭氧浓度分布既会受到中纬度气团的影响导致浓度升高,也会受到热带海洋气团的影响使得臭氧浓度降低。

虽然本文进行的是个例研究,但这些个例具有一定的代表性,因为不同地区的个例具有类似的特征. 由于利用探空对臭氧的垂直分布进行直接观测是十分昂贵的,在目前的经济条件下还难以在空间和时间上展开更广泛的直接观测,因此本文的研究结果对于判识对流层中上层臭氧浓度的变化具有直接的现实意义。

致 谢 感谢昆明市气象局、昆明市气象站和云南大学地球科学系对 2001 年昆明臭氧探测的大力协助. 感谢审稿专家提出的宝贵修改意见。

参考文献(References)

- [1] Danielsen E F. Stratosphere-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. *J. Atmos. Sci.*, 1968, **25**: 503~518
- [2] Holton J R, Haynes P H, McIntyre M E, et al. Stratosphere-troposphere exchange. *Rev. Geophys.*, 1995, **33**: 403~439
- [3] 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
- [4] Gouget H, Cammas J P, Marengo A, 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**(D20): 25979~25993
- [5] Carmichael G, Uno I, Phadnis M, et al. Tropospheric ozone production and transport in the springtime in East Asia. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(D9): 10649~10671
- [6] Zhu B, Akimoto H, Wang Z, et al. Why does surface ozone peak in summertime at Waliguan? *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**: L17104
- [7] Ma J, Zheng X, Xu X. Comment on "Why does surface ozone peak in summertime at Waliguan?" by Bin Zhu et al. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32**: L01805
- [8] 郑永光,陈鲁言,陈尊裕等. 2001 年春季临安、昆明和香港臭氧垂直分布特征的对比分析. 北京大学学报(自然科学版), 2005, **41**: 104~114
- Zheng Y G, Chan L Y, Chan C Y, et al. Comparison of characteristics of ozone vertical distribution above Lin'an, Kunming, and Hong Kong during spring 2001. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 2005, **41**: 104~114
- [9] 郑永光,朱佩君,陈尊裕等. 东南亚地区生物体燃烧影响华南地区对流层臭氧垂直分布的个例分析. 地球物理学报, 2004, **47**: 767~775
- Zheng Y G, Zhu P J, Chan C Y, et al. Influence of biomass burning in southeast Asia on the lower tropospheric ozone distribution over South China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, **47**: 767~775
- [10] 郑永光,陈 炯,朱佩君等. 南亚地区生物体燃烧对昆明地区对流层中下层臭氧浓度的影响. 北京大学学报(自然科学版), 2007, **43**: 330~337
- Zheng Y G, Chen J, Zhu P J, et al. Influence of biomass burning in South Asia on lower tropospheric ozone concentration over Kunming. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 2007, **43**: 330~337
- [11] 崔 宏,赵春生,郑向东等. 2001 年春季临安地区对流层臭氧异常增加的一次过程分析. 大气科学, 2005, **29**: 259~266
- Cui H, Zhao C S, Zheng X D, et al. Analysis of an extraordinary tropospheric ozone enhancement event at Lin'an in the spring of 2001. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**: 259~266
- [12] 王卫国,樊雯璇,吴 润等. 全球平流层-对流层之间臭氧通量的时空演变研究. 地球物理学报, 2006, **49**: 1595~1607
- Wang W G, Fan W X, Wu J, et al. A study of spatial-temporal evolution of the global cross-tropopause ozone mass flux. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**: 1595~1607
- [13] 江 芳,王英鉴,刘振兴等. 云顶以下臭氧对 TOMS 反演臭氧总量的影响及反演方法的理论研究. 地球物理学报, 2007, **50**(2): 364~369
- Jiang F, Wang Y J, Liu Z X, et al. A theoretical study on the effect of ozone below cloud on total ozone retrieved by TOMS and a new inversion algorithm. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(2): 364~369
- [14] Komhyr W D. Operational handbook-ozone measurements to 40km altitude with model 4A ECC ozone sondes. NOAA

- Tech., memor, ERL, 1986. 1~149
- [15] 巴德 M J, 福布斯 G S, 格兰特 J R 等编. 卫星与雷达图象在天气预报中的应用. 北京: 科学出版社, 1998. 16~17
Bader M J, Forbes G S, Grante J R, et al. Images in Weather Forecasting—A Practical Guide for Interpreting Satellite and Radar Imagery (in Chinese). Beijing: Science Press, 1998. 16~17
- [16] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国等. 大气物理学. 北京: 北京大学出版社, 2003. 1~60
Sheng P X, Mao J T, Li J G, et al. Atmospheric Physics (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 2003. 1~60
- [17] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文等. 天气学原理与方法. 北京: 气象出版社, 1992. 266~267
Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, et al. Principles and Methods of Synoptics (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1992. 266~267
- [18] 杨贵名. 南方低温阴雨严重华北春旱多大风—1996 年 3 月. 气象, 1996, **22**: 58~61
Yang G M. Low temperature and overcast, rainfall over South China and more strong wind over North China—March 1996. *Meteorological Mon.* (in Chinese), 1996, **22**: 58~61
- [19] 张金艳. 全国大部降水偏少北方多风沙天气—2001 年 3 月. 气象, 2001, **27**: 58~61
Zhang J Y. Less precipitation over most of China and more dust storm over North China—March 2001. *Meteorological Mon.* (in Chinese), 2001, **27**: 58~61
- [20] 叶殿秀. 北方地区降水偏少旱情持续降温幅度大局部地区有冻害—2001 年 4 月. 气象, 2001, **27**: 62~63
Ye D X. Less precipitation, continuous drought, great dropped temperature, and frozen injury of part area over North China—April 2001. *Meteorological Mon.* (in Chinese), 2001, **27**: 58~61
- [21] Shapiro M A, Hampel T, Krueger A J. The Arctic tropopause fold. *Mon. Weath. Rev.*, 1986, **115**: 444~454
- [22] Austin J F, Midgley P R. The climatology of the jet stream and stratospheric intrusions of ozone over Japan. *Atoms. Environ.*, 1994, **28**: 39~52
- [23] Appenzeller C, Davies H C. Structure of stratospheric intrusions into the troposphere. *Nature*, 1992, **358**: 570~572
- [24] 罗格 B, 威尔顿, 苏珊 J. 哈默斯著. 郑新江, 陆文杰等译. 水汽图象在天气分析和天气预报中的解译与应用. 北京: 气象出版社, 1994. 82~83
Roger B W, Susan J H. Water Vapor Imagery Interpretation and Applications to Weather Analysis and Forecasting (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1994. 82~83
- [25] 丁一汇. 高等天气学. 北京: 气象出版社, 1991. 171~188
Ding Y H. Advanced Synoptics (in Chinese). Beijing: Meteorological Press, 1991. 171~188
- [26] Cui H, Zhao C, Qin Y, et al. An estimation of ozone flux in a stratosphere-troposphere exchange event. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**: 167~174
- [27] 王洪庆, 张 焱, 陶祖钰等. 五维大型复杂数据集计算机可视化. 自然科学进展, 1998, **8**: 742~748
Wang H Q, Zhang Y, Tao Z Y, et al. Computer visualization for 5-dimension large-complicated data. *Prog. in Natur.* (in Chinese), 1998, **8**: 742~748
- [28] Liu H Y. Variation of total ozone and characteristics of vertical ozone distribution over Hong Kong [Ph. D. thesis]. Hong Kong: The Hong Kong Polytechnic University, 1997
- [29] Chan L Y, Chan C Y, Liu H Y, et al. A case study on the biomass burning in Southeast Asia and enhancement of tropospheric ozone over Hong Kong. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **27**: 1479~1482
- [30] Gidel L T, Shapiro M A. General circulation model estimates of the net vertical flux of ozone in the lower stratosphere and the implications for the tropospheric ozone budget. *J. Geophys. Res.*, 1980, **85**: 4049~4058
- [31] 朱瑞兆. 东亚的气候锋. 气象学报, 1963, **33**: 527~536
Zhu R Z. The climatic frontal zones over East Asia. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1963, **33**: 527~536

(本文编辑 何 燕)