

# 1998年青藏高原臭氧低值中心异常 及其背景环流场的分析

周任君 陈月娟

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

**摘要** 采用 TOMS 和 SAGE II 臭氧卫星观测资料, 对 1998 年青藏高原臭氧低值中心异常变化的过程和垂直结构进行了分析。为了探讨 1998 年这个低值中心出现异常的原因, 利用 NCEP/NCAR 再分析资料, 通过 1998 年高原附近上空位势场和位温的变化, 分析了 1998 年臭氧低值中心异常期间高原上空对流层上层到平流层下层的流场和垂直运动的变化特征。结果表明, 1998 年 11 月, 青藏高原上空对流顶比正常年份高, 无论是对流层上层还是平流层下层, 上升运动都比正常年份强。同时高原上空南亚高压也比正常年份强, 于是使得 1998 年高原上空的强臭氧低值中心一直维持到 11 月。

**关键词** 青藏高原 臭氧低值中心 南亚高压

**文章编号** 1006-9585 (2006) 02-0169-06 **中图分类号** P421 **文献标识码** A

## Anomaly of the Ozone Low Center over the Tibetan Plateau in 1998 and the Surrounding Flow Field

ZHOU Ren-Jun and CHEN Yue-Juan

*School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*

**Abstract** Based on the data sets from TOMS and SAGE II, the anomaly of ozone low center over the Tibetan Plateau in 1998 has been analyzed both in its variation process and in its vertical distribution. In order to investigate the cause for the anomaly, the variation of the flow field and the vertical motion in 1998 over the plateau was analyzed through the changes of the geopotential height and potential temperature by using the NCEP/NCAR monthly mean reanalysis data. The result shows that the tropopause over the plateau in November 1998 was much higher than normal and the ascend motion over the plateau both in the upper troposphere and in the lower stratosphere was stronger than the normal in November 1998; In the same period, the South Asian High was also stronger than the normal. These are the reason for the strong ozone low center over the plateau in 1998 maintained to November.

**Key words** Tibetan Plateau, ozone low center, South Asia High

## 1 引言

臭氧是大气中的重要微量成分之一。臭氧能吸收有害的太阳短波辐射, 起到保护地球生物圈

的作用。同时臭氧吸收太阳紫外辐射加热大气, 使其成为平流层的主要热源。臭氧含量的变化会改变大气垂直辐射平衡, 导致气候的变化。20 世纪以来, 臭氧的研究得到了广泛的重视。

1994 年, 周秀骥等<sup>[1]</sup>采用 TOMS 资料分析了

**收稿日期** 2004-08-16 收到, 2005-09-12 收到修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40375012

**作者简介** 周任君, 男, 1976 出生, 博士, 主要从事中层大气研究。E-mail: zrzj@ustc.edu.cn

中国地区 13 年 (1979~1991 年) 平均的臭氧总量月平均值分布, 发现了青藏高原夏季的臭氧低值中心 (或臭氧低谷)。其特征为: 在 1 月份臭氧总量的等值线基本上与纬圈平行, 但到 6 月份, 在青藏高原上空出现了明显的臭氧总量低值, 这个中心一直维持到 9 月份, 10 月份以后, 臭氧低值中心逐渐消失。青藏高原臭氧低值中心的这一发现立即引起了国内和国际科学界的关注, 开展了更多的观测和理论研究。在理论研究方面, 邹捍等<sup>[2~5]</sup>讨论了高原上空夏季臭氧总量季节变化及其与地面加热和 ENSO 现象的关系, 卞建春等<sup>[6]</sup>则指出夏季高原四周的辐合和爬升气流对于高原周围低空物质向高原上空的平均输送有重要的意义。刘煜等<sup>[7~8]</sup>通过分析 TOMS 资料发现夏季青藏高原臭氧低谷有加深的趋势, 并利用三维化学输送模式 (OSLO CTM2) 模拟青藏高原夏季臭氧低谷, 结果表明: 在青藏高原夏季臭氧低谷的形成和变化过程中, 动力输送过程起着最主要作用, 化学过程部分补偿了输送过程引起的臭氧减少。付超等<sup>[9]</sup>利用数值模拟方法也证实了夏季青藏高原的动力和热力作用是形成青藏高原上空臭氧总量低值区的主要原因之一。在进一步对观测资料的分析研究中, 不但看到 1991 年以后夏季青藏高原上空的臭氧低值中心继续存在, 而且可以看到不同年份这个低值中心的强度和位置会有变化。特别是除多<sup>[10]</sup>根据 TOMS 卫星资料分析了 1996~1999 年拉萨地区月平均臭氧总量变化情况, 指出: 1998 年 3 月臭氧总量达到整个时间段的月平均最高值, 之后以较大的幅度逐渐下降, 一直到该年的 11 月, 整整持续下降了 8 个月, 11 月达到该年臭氧月平均值最低点, 而后才平稳上升。这种长时间、大幅度的连续下降情况是少有的。

为了进一步搞清楚 1998 年青藏高原低值中心异常的特征以及形成这种异常的原因, 本文同时利用 TOMS 和 SAGE II 臭氧卫星资料分析了 1998 年青藏高原臭氧低值中心异常的变化过程和臭氧垂直分布的变化, 再利用 NCEP/NCAR 再分析资料, 分析当时的高空流场、位温场以及位势场与多年平均值的差异, 探讨它们之间的关系。

## 2 资料与处理方法

本文定义的青藏高原区域为 ( $28^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ ,  $75^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$ )。

美国宇航局 (NASA) 提供的 TOMS (第 7 版) 资料包括 4 颗卫星数据, 分别为 ADEOS、Nimbus7、Meteor3 和 Earth Probe。由于 ADEOS 和 Meteor3 两卫星历时短, 所以本文主要采用 1978 年 11 月~1993 年 4 月 Nimbus 7 和 1996 年 8 月~2003 年 2 月的 Earth Probe 数据。

SAGE II 为美国航空航天局研制的星载多通道辐射计, 它采用太阳掩星方法测量大气微量成分和气溶胶的垂直分布。SAGE II 是一个七通道太阳辐射计, 主要用于测量平流层臭氧、气溶胶、二氧化氮和水汽。平流层臭氧测量结果的误差小于 10%, 但低层易受云和气溶胶的影响而精度下降。本文所用 SAGE II 数据的时间段为 1984 年 10 月~2000 年 7 月, 取日出时数据。

## 3 1998 年青藏高原臭氧低值中心的特征

采用 TOMS 臭氧总量数据, 可以看到 1998 年青青藏高原臭氧低值中心与一般年份有明显不同。通常从 6 月到 10 月的夏秋季节, 在青藏高原上空会出现一个明显的臭氧总量低值中心, 其中心的臭氧总量值比同纬度地区的臭氧总量减少 10% 左右。而在冬春季节, 臭氧总量的等值线几乎与纬线平行。图 1a 为多年平均 11 月高原及其附近地区臭氧总量分布, 图 1b 为 1998 年 11 月臭氧总量分布, 图 1c 为 1998 年 11 月臭氧总量与多年平均的差值分布。从图 1 中可以看出, 对于多年平均 11 月臭氧总量分布, 低值中心已经比较弱, 其中心值约为 250 DU, 其位置已南移到青藏高原南部边缘。而在 1998 年 11 月, 臭氧低值中心出现在 ( $30^{\circ}\text{N}$ ,  $90^{\circ}\text{E}$ ) 附近, 较多年平均要北移, 而且强度较多年平均强很多, 中心值低于 230 DU, 与通常年份 8、9 月的臭氧低值中心位置和强度类似。从图 1c 可以看出, 与多年平均相比, 1998 年 11 月青藏高原及其周边地区臭氧总量明显偏低, 高原上大部分地区臭氧偏低 10~25 DU, 其中减少

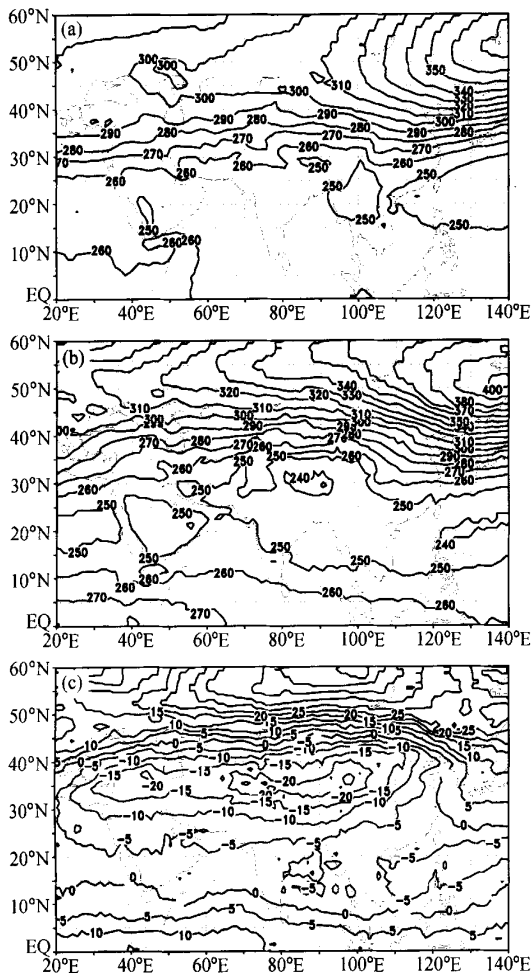


图1 11月臭氧总量的分布(单位: DU)。(a) 多年平均; (b) 1998年; (c) 1998年与多年平均的差值

Fig.1 Distribution of total column ozone in November (in DU). (a) Averaged for 20 years; (b) in 1998; (c) difference between total ozone in 1998 and the averaged value

最大的地方位于青藏高原东北部(36°N, 98°E)附近。30~40°N之间, 从地中海东岸直到中国华北地区上空臭氧总量减少均大于10 DU, 其中减少最多的地区主要位于青藏高原上空。

图2为青藏高原上空1998年臭氧总量值的逐月变化及其与多年平均的对比。对于多年平均, 青藏高原上空臭氧总量在3月达最大值, 随后慢慢减少, 10月达到一年中的最小值, 随后又慢慢增多。而对于1998年, 从5~10月臭氧总量值与多年平均值相近, 但11月比多年平均值低出17 DU, 12月臭氧总量值才开始回升。1998年高原臭氧低值中心持续时间之长, 而且最低值延续到

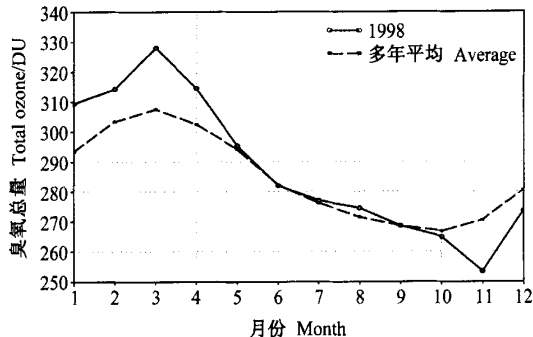


图2 青藏高原上空臭氧总量多年平均以及1998年的月变化

Fig.2 Monthly variation of total column ozone over the Tibetan Plateau. Solid line for averaged value and dashed line for 1998

11月, 这是历年来仅有的一次。

为了验证1998年臭氧总量变化的特殊情况, 本文还采用了SAGE II臭氧数密度垂直分布来分析。图3为11月青藏高原上空臭氧数密度的垂直分布。从图3b可以看出, 1998年11月青藏高原上空绝大部分高度的臭氧数密度比多年11月的平均值低, 这与TOMS所测得的1998年11月青藏高原上空臭氧总量比多年平均值低一致。图3表明, 与多年11月平均值相比, 1998年11月青藏高原上空臭氧数密度主要减少在8~28 km, 其中在18 km附近减少最多。

## 4 1998年11月流场、位温及位势场分布特征

为了研究1998年臭氧低值中心异常的成因, 本文用SAGE II中的对流层顶高度以及NCEP/NCAR再分析资料来分析1998年11月流场、位温及位势场与多年平均的差异。图4为对流层顶高度的逐月变化。对于多年平均, 青藏高原上空对流层顶冬季最低在12 km附近, 夏季对流层顶升高, 可达到16.5 km, 到11月, 对流层顶下降到14 km附近。1998年6~10月, 对流层顶略高于多年平均, 而11月, 青藏高原上空对流层顶高出多年平均2 km。这表明1998年11月高原上空垂直上升运动较多年平均强。图5为纬度带28~40°N之间1998年11月流场与多年平均的差值分布, 阴影为地形高度。与多年平均相比, 1998年11月在青藏高原上空500 hPa以上存在一股上升

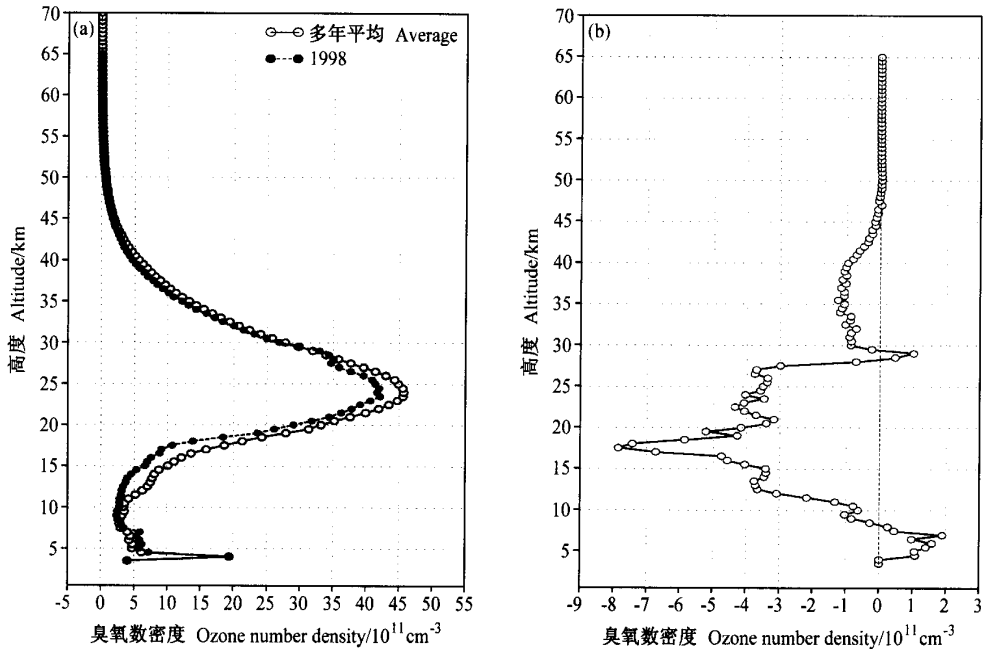


图3 11月青藏高原上空 SAGE II 所测臭氧数密度的垂直分布。(a) 多年平均分布和1998年分布；(b) 1998年11月与多年11月平均值的差值分布

Fig. 3 Vertical distribution of ozone number density in November over the Tibetan Plateau from SAGE II observation. (a) For averaged value and the value in 1998; (b) the value in 1998 minus the averaged value

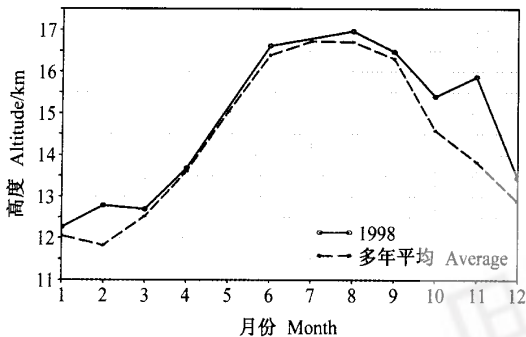


图4 多年平均以及1998年青藏高原对流层顶高度的逐月变化

Fig. 4 Monthly variation of tropopause height over the Tibetan Plateau. Solid line for 1998 and dashed line for average

气流, 并且气流在高原上空向四周辐散。1998年11月在  $15 \sim 20^\circ \text{N}$  之间北上气流增强, 当这股气流北上遇到青藏高原时抬升, 在高原上空与北部一股弱南下气流汇合, 垂直上升速度在青藏高原上空  $300 \sim 100 \text{ hPa}$  之间达到最大。上升运动的加强更有利于高原低空含臭氧少的空气向高原上空输送。下面再来看看  $100 \text{ hPa}$  附近流场和位势场的情况。我们在最近的一篇文章中<sup>[11]</sup>, 分析过青

藏高原和伊朗高原臭氧总量变化与南亚高压的关系, 得出: 南亚高压位置和强度的变化对高原上空臭氧含量有一定影响。在这里, 我们也对1998年南亚高压进行一下分析。图6为  $100 \text{ hPa}$  等压面上1998年11月水平流场及位势高度与多年平均11月的差值分布。可以看出1998年11月青藏高原上空  $100 \text{ hPa}$  南亚高压比多年平均强, 气流向高原四周辐散。1998年11月流场和位势场的分布特征有利于低层含臭氧少的大气向上传输, 而上层含臭氧较多的空气向四周流散, 从而使得高原上空臭氧浓度减少。

以上讨论了对流顶及其以下约  $10 \sim 16 \text{ km}$  气层高原上空1998年11月臭氧减少的原因, 但是从图3可以看出,  $10 \sim 16 \text{ km}$  气层臭氧的减少还不是最主要的,  $16 \sim 28 \text{ km}$  臭氧的减少更重要, 因此下面我们要讨论一下对流顶以上的情况。由于对流层顶以上风速测量及其计算的准确性不太好, 本文同邹捍等<sup>[3]</sup>的方法一样, 采用位温来分析高空垂直运动。当空气块做干绝热运动时, 位温守恒。对流层顶和平流层中下层的水汽含量低, 大气运动可视为干绝热运动, 位温恒定不变。当

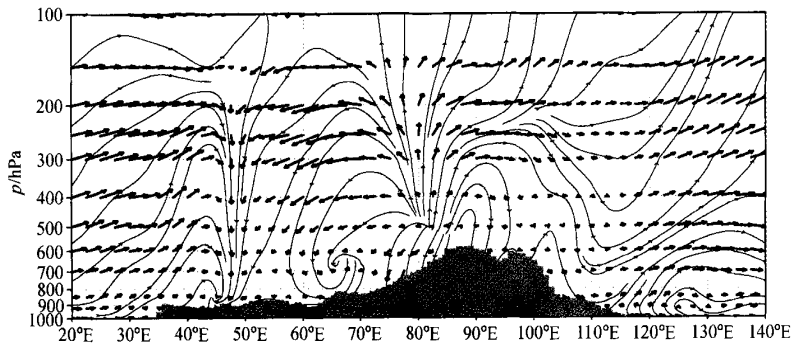


图 5 1998 年 11 月与多年平均 11 月青藏高原附近差值流场分布  
Fig. 5 Difference of the vertical flow field surrounding the Tibetan Plateau in November (1998 minus average)

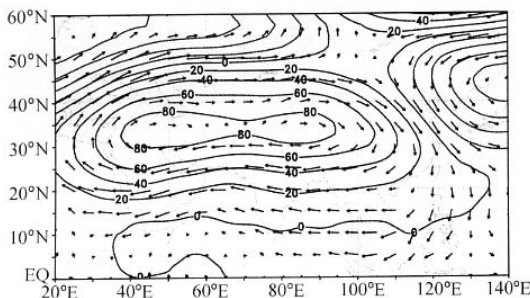


图 6 1998 年 11 月与多年平均 11 月 100 hPa 等压面水平流场  
差值及位势高度差值 (单位: gpm) 分布  
Fig. 6 Difference of the horizontal flow field and geopotential  
height (in gpm) at 100 hPa in November (1998 minus average)

气块上升时, 等位温面抬升, 位温下降。所以, 从位温的变化, 可以反映垂直运动情况。在文献 [11] 中, 我们曾给出过高原臭氧总量的变化与其上空 100 hPa 位温的变化有很好的正相关关系。图 7a、b 为青藏高原上空多年平均的和 1998 年的位温的逐月变化。可以看出高原上空 150~50 hPa 在 6~9 月等位温面抬升, 上升气流增强。同时还可以看到, 1998 年 10 和 11 月从 150 hPa 以上的各等位温面都比多年平均偏高。图 7c 是 1998 年高原上空位温与多年平均值的差值。可以看出高原上空 150 hPa 到 10 hPa 1998 年 11 月位温比常年下降了 2~8 K, 位温下降最大的高度在 25 hPa 附近, 也就是说 1998 年 11 月高原上空平流层中下层的上升运动也比多年平均强, 而且上升运动最强处在 25 hPa 附近。由于臭氧数密度大约在 25 hPa 达到最大值, 所以低空大气中臭氧浓度低, 25 hPa 附近及其下层上升气流增强, 会起到稀释

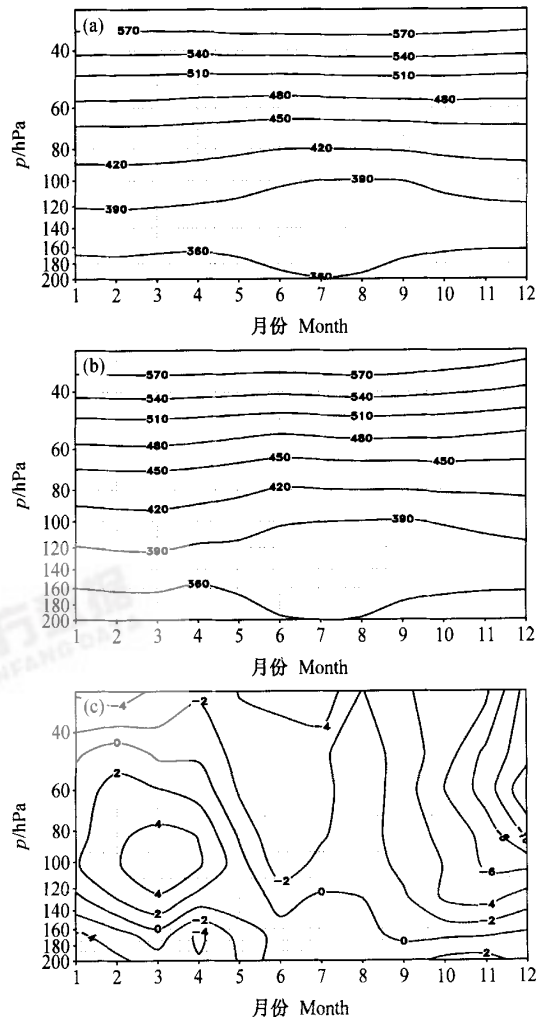


图 7 青藏高原上空 1998 年以及多年平均的位温的逐月变化 (单位: K)。(a) 多年平均位温变化; (b) 1998 年位温变化; (c) 1998 年与多年平均差值的变化  
Fig. 7 Monthly variation of potential temperature (in K). (a) For averaged value; (b) for 1998; (c) for their difference (1998 minus average)

该气层臭氧浓度的作用,同时随着其上层上升运动的减弱,气流将向四周辐散,于是引起高原上空 16~28 km 气层臭氧的大量流失。

## 4 结论

青藏高原上空的臭氧低值中心通常出现在 6~10 月的夏秋季节,而 1998 年臭氧低值中心持续到 11 月,而且中心十分明显。通过对 SAGE II 资料的分析,找出了 1998 年 11 月高原上空臭氧浓度减少的气层主要是 8~28 km。为了搞清 1998 年 11 月高原臭氧低值中心异常的原因,本文进一步分析了 1998 年高原地区附近对流顶高度的变化以及 8~28 km 气层附近的流场、位势场和位温场的变化。结果表明,1998 年臭氧低值中心变化的异常由以下原因导致:

(1) 1998 年 11 月青藏高原上空对流层顶高出多年平均 2 km,高原上空垂直上升运动较多年平均强。与多年平均相比,高原上空 500 hPa 以上到 100 hPa 存在一股上升气流,并且气流在高原上空向四周辐散。

(2) 与多年平均相比,1998 年 11 月青藏高原上空 100~10 hPa 高度上位温值低于多年平均值,等位温面抬升,上升气流较多年平均强,更有利于低空臭氧浓度较低的空气向上输送,替换了臭氧层浓度较高的空气,从而使高原上空臭氧总量减少。

## 参考文献 (References)

- [1] Zhou Xiuji, Luo Chao. Ozone valley over Tibetan Plateau. *Acta Meteorologica Sinica*, **8** (4): 505~506
- [2] Zou Han. Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet. *Geophys. Res. Lett.*, 1996, **23**: 1029~1032
- [3] Zou Han, Gao Yongqi. Vertical ozone profile over Tibet using Sage I and II data. *Adv. Atmos. Sci.*, 1997, **14**: 505~512
- [4] 邹捍, 郜永祺, 周立波. 大尺度山地上空的臭氧低值和地面加热. *气候与环境研究*, 1998, **3** (3): 209~217  
Zou Han, Gao Yongqi, Zhou Libo. Ozone low and surface heating over large scale topography. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1998, **3** (3): 209~217
- [5] 邹捍, 季崇萍, 周立波, 等. 青藏高原臭氧的 ENSO. *气候与环境研究*, 2001, **6** (3): 267~272  
Zou Han, Ji Chongping, Zhou Libo, et al. ENSO signal in total ozone over Tibet. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2001, **6** (3): 267~272
- [6] 卞建春, 李维亮, 周秀骥. 青藏高原及其临近地区流场结构季节性变化的特征分析. 见: 周秀骥主编, 中国地区大气臭氧及其对气候环境的影响 II. 北京: 气象出版社, 1997. 257~273  
Bian Jianchun, Li Weiliang, Zhou Xiuji. Analysis of the seasonal variation feature of the wind structure over Tibetan Plateau and its surroundings. In: *Atmospheric Ozone and Its Impact on Climate and Environment in China* (in Chinese), Zhou Xiuji, Ed. Beijing: China Meteorological Press, 1997. 257~273
- [7] 刘煜, 李维亮. 青藏高原臭氧低值中心的加深及其可能的影响. *气象学报*, 2001, **59** (1): 97~105  
Liu Yu, Li Weiliang. Deepening of ozone valley over Tibetan Plateau and its possible influences. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (1): 97~105
- [8] Liu Yu, Li Weiliang, Zhou Xiuji, et al. Mechanism of formation of the Ozone valley over Tibetan Plateau in summer: transport and chemical process of Ozone. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (1): 103~109
- [9] 付超, 李维亮, 周秀骥. 夏季青藏高原上空臭氧总量低值区形成的模拟实验. 见: 周秀骥主编, 中国地区大气臭氧及其对气候环境的影响 II. 北京: 气象出版社, 1997. 274~284  
Fu Chao, Li Weiliang, Zhou Xiuji. Numerical simulation of the formation of ozone valley over Tibetan Plateau in summer. In: *Atmospheric Ozone and Its Impact on Climate and Environment in China* (in Chinese), Zhou Xiuji, Ed. Beijing: China Meteorological Press, 1997. 274~284
- [10] 除多. 青藏高原大气臭氧研究. *气象*, 2001, **26** (4): 3~7  
Chu Duo. Study on atmospheric total ozone over Tibetan Plateau. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2001, **26** (4): 3~7
- [11] 周任君, 陈月娟. 青藏高原和伊朗高原上空臭氧变化特征及其与南亚高压的关系. *中国科学技术大学学报*, 2005, **35** (6): 899~908  
Zhou Renjun, Chen Yuejuan. The ozone variations over the Tibetan Plateau and the Iranian Plateau and their relation with the South Asia High. *Journal of University of Science and Technology of China* (in Chinese), 2005, **35** (6): 899~908