

舒斯, 何金海, 刘毅, 等. 2011. 夏季青藏高原 O<sub>3</sub> 低值与南亚高压东西振荡的关系 [J]. 气候与环境研究, 16 (1): 39-46. Shu Si, He Jinhai, Liu Yi, et al. 2011. Relationships between low O<sub>3</sub> and the longitudinal oscillation of the South Asia high over the Tibetan Plateau in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (1): 39-46.

## 夏季青藏高原 O<sub>3</sub> 低值与南亚高压东西振荡的关系

舒斯<sup>1,2,3</sup> 何金海<sup>1</sup> 刘毅<sup>2</sup> 王永<sup>2,4</sup> 蔡兆男<sup>2,4</sup> LIU Xiong<sup>5,6</sup>

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029

3 湖北省气象局, 武汉 430074

4 中国科学院研究生院, 北京 100049

5 Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA

6 Goddard Earth Sciences and Technology Center, University of Maryland, Baltimore County, MD, USA

**摘要** 利用 O<sub>3</sub> 监测仪 (Ozone Monitoring Instrument, OMI) 卫星 O<sub>3</sub> 廓线资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 研究了 2006 年夏季南亚高压偏西型和偏东型条件下青藏高原地区 O<sub>3</sub> 垂直结构和变化特征差异。结果表明, 夏季南亚高压东西振荡与青藏高原 O<sub>3</sub> 分布存在密切的关系, 在西 (东) 部型南亚高压条件下, 夏季青藏高原地区大气、对流层和平流层 O<sub>3</sub> 柱总量低值中心均偏西 (东), 位于青藏高原西 (东) 部, 尤其是在南亚高压最强的对流层顶附近, O<sub>3</sub> 低值中心位于南亚高压中心。在西部型南亚高压条件下, 低纬度地区含低浓度 O<sub>3</sub> 的空气不易到达高原上空, 青藏高原上空的 O<sub>3</sub> 低值较弱。在东部型南亚高压条件下, 从低纬度经中南半岛西北方向孟加拉湾带来的低纬地区低浓度 O<sub>3</sub>, 在青藏高原上空堆积, 形成 O<sub>3</sub> 低值中心。因此, 南亚高压东西振荡是影响青藏高原上空 O<sub>3</sub> 低值中心变化的重要因素之一, 该研究对理解南亚高压东西振荡机制及提高我国气候预测具有一定的指导意义。

**关键词** O<sub>3</sub> 低值 南亚高压 O<sub>3</sub> 监测仪 青藏高原 东西振荡

**文章编号** 1006-9585 (2011) 01-0039-08 **中图分类号** P434 **文献标识码** A

## Relationships between Low O<sub>3</sub> and the Longitudinal Oscillation of the South Asia High over the Tibetan Plateau in Summer

SHU Si<sup>1, 2, 3</sup>, HE Jinhai<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>2</sup>, WANG Yong<sup>2, 4</sup>, CAI Zhaonan<sup>2, 4</sup>, and LIU Xiong<sup>5, 6</sup>

1 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Hubei Provincial Meteorological Bureau, Wuhan 430074

4 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

5 Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, MA, USA

6 Goddard Earth Sciences and Technology Center, University of Maryland, Baltimore County, MD, USA

**收稿日期** 2009-05-26 收到, 2010-11-11 收到修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40633015

**作者简介** 舒斯, 女, 硕士, 主要从事中层大气过程研究。E-mail: shusi1985516@163.com

**通讯作者** 刘毅, E-mail: liuyi@mail.iap.ac.cn

**Abstract** Based on the data sets of Ozone Monitoring Instrument (OMI)  $O_3$  profiles over the Tibetan Plateau and the NCEP/NCAR reanalysis data in July 2006, the relationships between low  $O_3$  over the Tibetan Plateau and the longitudinal oscillation of the South Asia high are analyzed. The results show that the longitudinal oscillation of the South Asia high has an obvious correlation with the low  $O_3$  over the Tibetan Plateau. When the South Asia high exhibits the east (west) phase, the low  $O_3$  centers of the total column  $O_3$ , the tropospheric column  $O_3$ , and the stratospheric column  $O_3$  are located in the east (west) of the Tibetan Plateau. During the west phase of the South Asia high, the low  $O_3$  air is difficult to transport to the top of the Tibetan Plateau and the low  $O_3$  is weak over the Tibetan Plateau. While during the east phase of the South Asia high, the low  $O_3$  air from the Bay of Bengal is transported northward to the middle troposphere over the Tibetan Plateau by southeast currents and piles over the Tibetan Plateau, forming the low  $O_3$ . So the longitudinal oscillation of the South Asia high is one of the most important factors contributing to the variation of the low  $O_3$  over the Tibetan Plateau, and the study is good for understanding the mechanism of the longitudinal oscillation of the South Asia high and improving the quality of climate forecast in China.

**Key words** low  $O_3$  center, South Asia high, ozone monitoring instrument, Tibetan Plateau, longitudinal oscillation

## 1 引言

$O_3$ 是大气中最重要的微量成分之一,是研究气候变化问题不可忽略的重要因素。近几十年,根据大量的观测资料发现,全球  $O_3$ 层在发生变化,大部分地区的  $O_3$ 总量在不断下降(Stolarski et al., 1992; 任福民等, 1998)。科学家先后在南北两极上空观测到了  $O_3$ 洞现象(Farman et al., 1985; Manney et al., 1994)。1982年, Reiter and Gao (1982)发现,4月中下旬,当南亚高压移向青藏高原并维持时,高原上空的  $O_3$ 总量出现了相应的低值区。1995年, Zhou and Luo (1995)进一步指出,5~9月在青藏高原上空存在明显的  $O_3$ 总量低值中心。青藏高原  $O_3$ 低值中心的发现立即引起了科学界的关注,开展了一些相关研究(周秀骥等, 2004)。Zou (1996)、Zou and Gao (1997)发现青藏高原上空  $O_3$ 亏损的季节变化与该地区地表加热造成的物质抬升过程密切相关,其主要亏损由大气动力输送引起。卞建春等(1997)、付超等(1997)、王喜红和李兴生(1998)和 Liu et al. (2003)分别通过数值模拟分析得到,夏季青藏高原本身独特的地形及其动力和热力作用是形成青藏高原上空  $O_3$ 总量低值区的主要原因。

南亚高压是夏季亚洲南部对流层上层和平流层底层的一个强大而稳定的大气活动中心,是副

热带高压系统中的一个重要成员,它与夏季北半球大气环流和亚洲区域天气气候关系密切,并且与青藏高原和伊朗高原上空  $O_3$ 含量的变化有着密切的关系(周任君和陈月娟, 2005)。对于南亚高压来说,其重要的一个活动特征就是在青藏高原和伊朗高原上空“东西振荡”。由于缺乏对流层  $O_3$ 观测资料,对南亚高压东西振荡过程中青藏高原上空  $O_3$ 低值中心变化特征的研究尚不多见。随着卫星遥感技术的发展, Liu et al. (2005)利用全球  $O_3$ 监测仪(Global Ozone Monitoring Experiment, GOME)首次反演得到了全球对流层  $O_3$ 廓线,随后利用  $O_3$ 监测仪(Ozone Monitoring Instrument, OMI)卫星观测资料得到了更高时空分辨率的对流层  $O_3$ 廓线资料。本文利用 OMI  $O_3$ 廓线资料和 NCEP/NCAR 再分析气象场资料,研究了青藏高原上空对流层  $O_3$ 低值中心与南亚高压东西振荡的关系。

首先,根据青藏高原上空7月100 hPa西风零线上位势高度最大值的位置来判断南亚高压中心位置(张琼等, 2000),定义高压中心位于  $80^\circ E$ 以西为西部型,  $95^\circ E$ 以东为东部型,其他为带状型。然后,对西部型和东部型南亚高压条件下青藏高原地区大气、对流层和平流层  $O_3$ 柱总量进行了分析和对比,并且通过对南亚高压中心的  $O_3$ 廓线及风场垂直分布、等压面上  $O_3$ 浓度及风场水平分布的分析,进一步探讨南亚高压东西振荡对青藏高原上空  $O_3$ 低值中心的影响。

## 2 卫星资料简介

O<sub>3</sub> 监测仪是美国国家航天局 (NASA) 于 2004 年 7 月 15 日发射的 AURA 卫星上携带的 4 个传感器之一, 是继全球 O<sub>3</sub> 监测实验 (Global Ozone Monitoring Experiment, GOME) 和扫描成像大气吸收图谱仪 (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric Chartography, SCIAMACHY) 之后的新一代大气成分探测传感器。OMI 具有高光谱分辨率 (0.5 nm) 和高水平分辨率 (13 km<sup>2</sup> × 24 km<sup>2</sup>), 其波段范围为 270~500 nm, 相应的地面扫描幅宽为 2600 km, 保证了 OMI 具有很高的空间分辨率和每日一次的全球覆盖。传感器的分辨率在放大模式下可以提高到 13 km<sup>2</sup> × 12 km<sup>2</sup>, 使得 OMI 可以在云隙间获得大量的对流层信息。Liu et al. (2005) 等在 GOME 的大气 O<sub>3</sub> 垂直分布的反演算法基础上, 利用 270~330 nm 的 O<sub>3</sub> 吸收波段反演了基于 OMI 的包括对流层信息的 O<sub>3</sub> 廓线资料。蔡兆男等 (2009) 对上述卫星反演 O<sub>3</sub> 廓线在青藏高原的适用性和精度进行了验证。该资料包括从地面到 60 km 共 24 层的 O<sub>3</sub> 信息, 每层约 2.5 km, 水平分辨率为 0.5°(纬度) × 0.5°(经度)。将资料从地面积分到最高层得到了大气 O<sub>3</sub> 柱总量, 利用 NCEP 对流层顶高度资料, 将大气分为对流层和平流层两部分, 计算了对流层 O<sub>3</sub> 柱总量和平流层 O<sub>3</sub> 柱总量。

## 3 夏季青藏高原上空 O<sub>3</sub> 低值

图 1 是 2006 年 7 月 16 日青藏高原上空大气 O<sub>3</sub> 柱总量和 100 hPa 位势高度的水平分布。从图中可以看出青藏高原上空存在明显的 O<sub>3</sub> 低值中心, 小于 266 DU 的低值区主体在 1690 dagpm 等值线内。南亚高压强度较强, 中心位势高度大于 1700 dagpm, 位于 (37.5°N, 102.5°E)。

## 4 夏季南亚高压东西振荡特征

图 2 是 2006 年 7 月 100 hPa 南亚高压中心位置随时间的变化。从图 2 中可以看出, 南亚高压

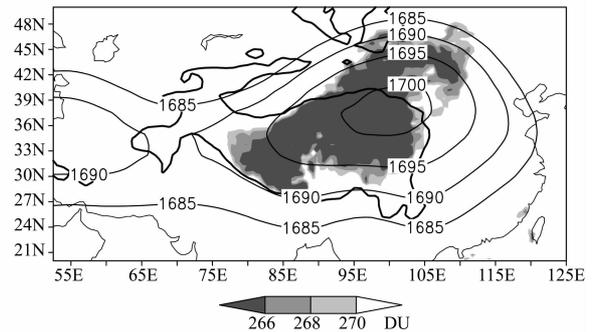


图 1 2006 年 7 月 16 日青藏高原上空大气 O<sub>3</sub> 柱总量 (阴影) 和 100 hPa 位势高度 (等值线, 单位: dagpm) 的水平分布 (粗实线表示青藏高原)

Fig. 1 Horizontal distribution of total column O<sub>3</sub> (shaded) and geopotential height at 100 hPa (isolines, units: dagpm) on 16 Jul 2006 (thick solid line denotes the Tibetan Plateau)

中心位置有明显的东西振荡特征, 振荡周期约为 20 d。7 月主要分为 4 个阶段, 其中 7 月 1~3 日为东部型, 南亚高压中心随时间东移北抬, 中心位势高度变化不大, 相对涡度减小。7 月 6~7 日为西部型, 南亚高压中心北抬, 位势高度为 1690 dagpm 左右、相对涡度为  $-4 \times 10^{-5} \sim -5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。7 月 14~21 日为东部型, 南亚高压中心东移北抬, 中心位势高度在 16 日达到 7 月最大值 (1700 dagpm), 此时高压中心相对涡度为  $-5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 南亚高压强度强。7 月 22~30 日为西部型。综合以上分析, 选取 7 月 23~30 日和 7 月 14~20 日作为典型的南亚高压西部型和东部型, 分析南亚高压东西振荡过程中青藏高原地区 O<sub>3</sub> 的变化特征。

## 5 O<sub>3</sub> 低值随南亚高压的变化

### 5.1 大气 O<sub>3</sub> 柱总量随南亚高压的变化

图 3 给出了典型的西部型和东部型条件下, 大气 O<sub>3</sub> 柱总量、100 hPa 位势高度的水平分布。从图中可以看到, 西部型 (图 3 a) 条件下, O<sub>3</sub> 低值中心强度较弱, 位于 (35°N, 80°E), 大气 O<sub>3</sub> 柱总量小于 270 DU 的低值区位于青藏高原西部, 90°E 以西, 范围较小。南亚高压强度较弱, 中心位势高度大于 1690 dagpm, 位于伊朗高原上空 (35°N, 65°E)。东部型 (图 3 b) 条件下, O<sub>3</sub> 低值中心强度较强, 大气 O<sub>3</sub> 柱总量小于 270 DU 的低值区位于青藏高原东部, 78°E 以东, 范围较大, 并

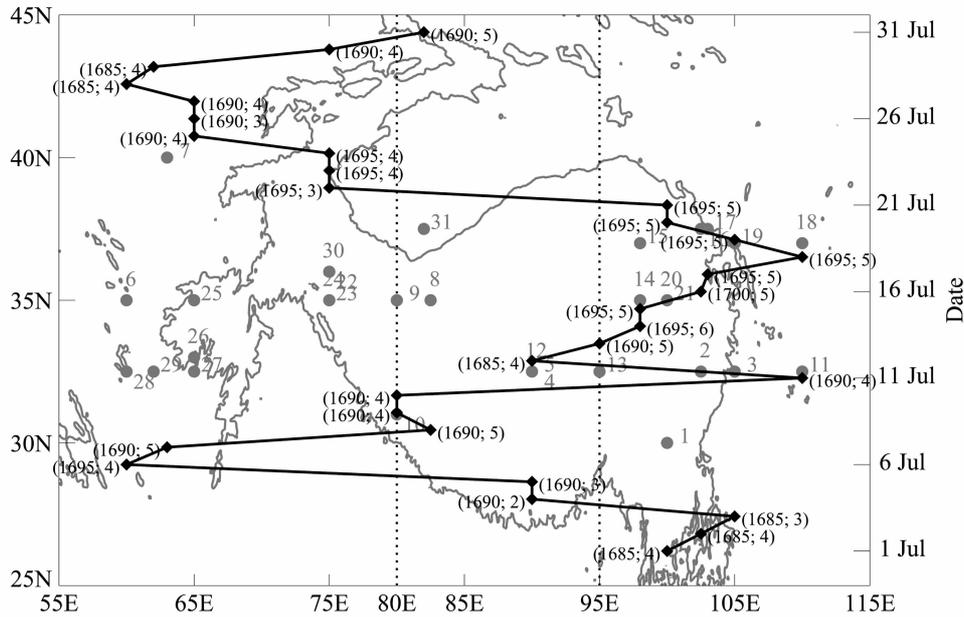


图2 2006年7月100 hPa南亚高压中心位置随空间和时间分布图。圆点表示南亚高压中心地理位置分布，圆点边上的数字表示日期。折线表示南亚高压中心位置随经度和时间的变化，其中括号内的数字分别表示南亚高压中心位势高度（单位：dagpm）和相对涡度（单位： $-10^{-5} s^{-1}$ ）。灰色线内为地形高度大于2 km的高原区域

Fig. 2 Spatial and temporal distributions of the center of the South Asia high at 100 hPa in Jul 2006. Round marks denote the horizontal distribution of the center of the South Asia high and the numbers represent the dates. The line with diamonds denotes the longitude and time variations. The numbers in brackets are geopotential height (units: dagpm) and relative vorticity (units:  $-10^{-5} s^{-1}$ ) at the center of the South Asia high at 100 hPa, respectively. The gray line shows the part of the plateau that the elevation is above 2 km

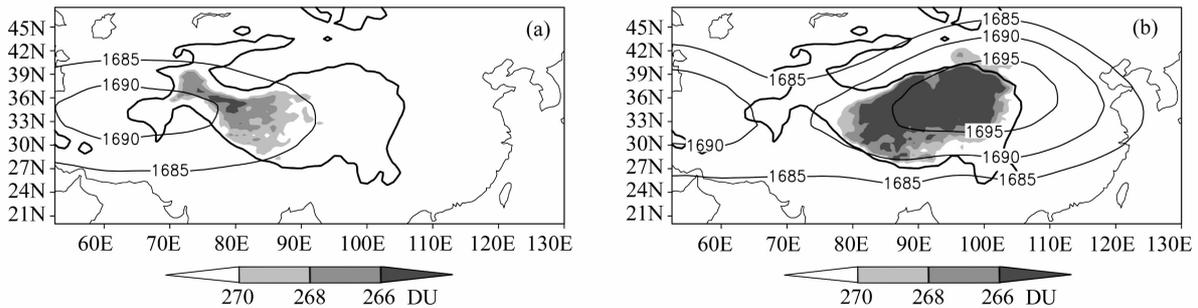


图3 (a) 西部型(7月23~30日平均)和(b)东部型(7月14~20日平均)南亚高压条件下,青藏高原上空大气O<sub>3</sub>柱总量(阴影)和100 hPa位势高度场(等值线,单位:dagpm)水平分布。粗实线表示青藏高原

Fig. 3 Horizontal distribution of the total column O<sub>3</sub> (shaded), geopotential height at 100 hPa (isolines, units: dagpm) during the (a) west phase (averaged from 23-30 Jul) and (b) east phase (averaged from 14-20 Jul) oscillation of the South Asia high. The thick solid line denotes the Tibetan Plateau

向高纬度地区扩展,小于266 DU的低值区主体在1695 dagpm等值线内。南亚高压强度较强,中心位势高度大于1695 dagpm,位于(35°N, 100°E)。由此得出夏季青藏高原上空存在明显的O<sub>3</sub>低值中心,并且在南亚高压东部型(西部型)条件下,大气O<sub>3</sub>总量低值区存在东部型(西部型)特征。

南亚高压中心的区域对流层顶抬升,对流层低浓度O<sub>3</sub>向平流层输送以及低空污染物化学过程,都可能是引起大气O<sub>3</sub>总量异常降低的原因(Zhou and Luo, 1995)。

5.2 对流层和平流层O<sub>3</sub>柱总量随南亚高压的变化

图4给出了2006年7月典型的西部型和东部

型条件下，对流层 O<sub>3</sub> 柱总量的水平分布。可以看出，在两种条件下，青藏高原上空均存在 O<sub>3</sub> 低值中心，最低值小于 27 DU。与西部型相比，东部型南亚高压条件下，对流层 O<sub>3</sub> 柱总量小于 27 DU 的范围几乎覆盖了青藏高原的主体部分，O<sub>3</sub> 低值中心更强。随着亚洲季风的发展，孟加拉湾及青藏高原上空对流增强，对流层低层及低纬度地区含低浓度 O<sub>3</sub> 的空气被输送到高原上空，并受到西风急流的阻挡，在青藏高原堆积，形成青藏高原对流层 O<sub>3</sub> 低值 (Liu et al., 2009)。

图 5 给出了 2006 年 7 月典型的西部型和东部型条件下，平流层 O<sub>3</sub> 柱总量水平分布。可以看出，在南亚高压中心的北部均存在一个 O<sub>3</sub> 低值中心，但中心位置偏离青藏高原上空，分别位于青藏高原的西北部和东北部。平流层 O<sub>3</sub> 柱总量分布与对流层 O<sub>3</sub> 柱总量不完全一致，这是由对流层和平流层环流结构的差异，以及 O<sub>3</sub> 产生和损耗的机制不同造成的。平流层 O<sub>3</sub> 低值中心不像对流层 O<sub>3</sub> 柱总量低值中心位于青藏高原上空，平流层 O<sub>3</sub> 柱

总量变化和南亚高压关系密切。平流层 O<sub>3</sub> 低值与对流层 O<sub>3</sub> 低值共同作用，形成了夏季青藏高原上空大气 O<sub>3</sub> 柱总量的低值中心。下面利用 OMI O<sub>3</sub> 廓线资料和 NCEP 再分析资料进一步分析 O<sub>3</sub> 低值形成的原因和机理。

### 6 O<sub>3</sub> 低值形成的原因

位涡 (Potential Vorticity, PV) 是一个描述大气涡旋运动的物理量，它在绝热无摩擦条件下具有守恒性，其单位 PVU 定义为  $10^{-6} \text{K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \equiv 1 \text{PVU}$ ，一般以 2 PVU (或 1.5 PVU) 的等值线来定义对流层顶 (Cui et al., 2004)。从图 6 可以看出，南亚高压西部型 (图 6 a) 条件下，O<sub>3</sub> 低值中心主要位于 35°N 以南、对流层中上层和西风带的南侧。南亚高压中心无明显的上升气流，并且主要由偏北风控制。相比较，南亚高压东部型 (图 6 b) 条件下，O<sub>3</sub> 低值中心偏北，在 45°N 附近另外存在一个 O<sub>3</sub> 低值中心。南亚高压中心主

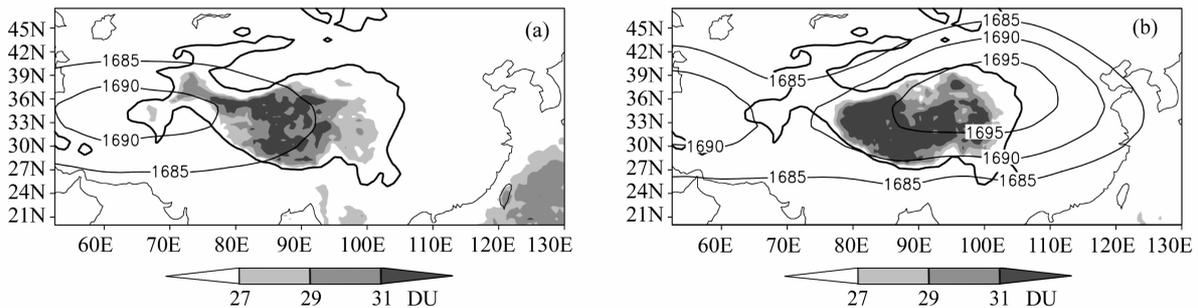


图 4 (a) 西部型和 (b) 东部型南亚高压条件下，对流层 O<sub>3</sub> 柱总量 (阴影) 和 100 hPa 位势高度场 (等值线，单位：dagpm) 水平分布。粗实线表示青藏高原

Fig. 1 Horizontal distribution of the tropospheric column O<sub>3</sub> (shaded), geopotential height at 100 hPa (isolines, units: dagpm) during the (a) west phase and (b) east phase oscillation of the South Asia high. The thick solid line denotes the Tibetan Plateau

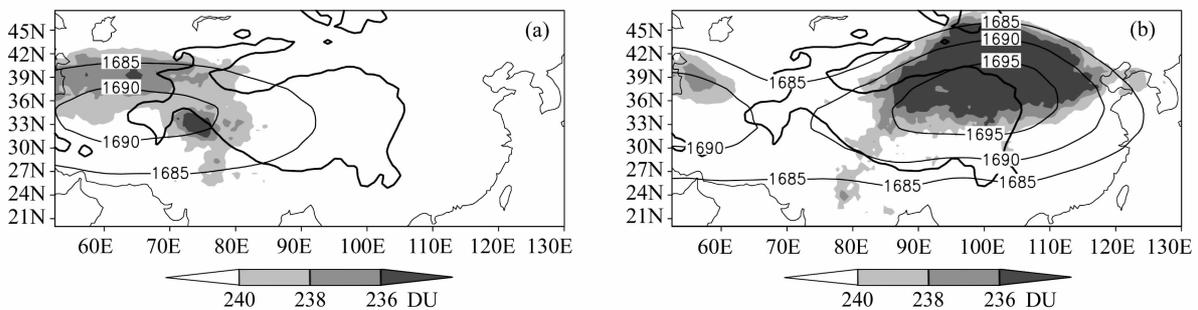


图 5 同图 4，但为平流层

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the stratospheric column O<sub>3</sub>

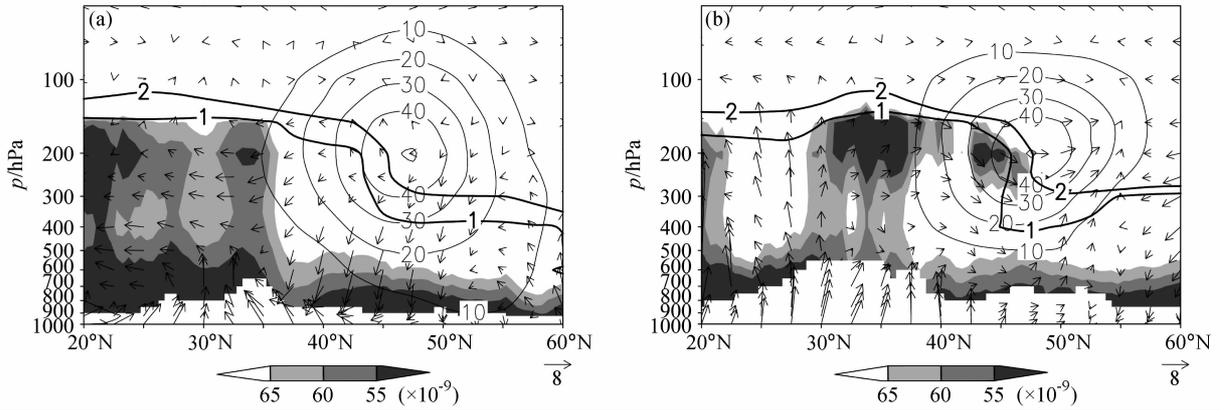


图6 (a) 西部型(沿 65°E) 和 (b) 东部型(沿 100°E) 南亚高压中心的 O<sub>3</sub> 浓度(阴影)、风场(矢量箭头, 水平风速单位: m · s<sup>-1</sup>, 垂直风速单位: -10<sup>-2</sup>Pa · s<sup>-1</sup>)、纬向西风(等值线)和 PV(粗实线, 单位: PVU) 经向垂直分布

Fig. 6 Meridional cross section of the O<sub>3</sub> mixing ratio (shaded), vertical circulation (vector arrows, horizontal wind units: m · s<sup>-1</sup>, vertical wind units: -10<sup>-2</sup>Pa · s<sup>-1</sup>), zonal wind (isolines), and potential vorticity (thick solid lines, units: PVU) during the (a) west phase (along 65°E) and (b) east phase (along 100°E) oscillation of the South Asia high

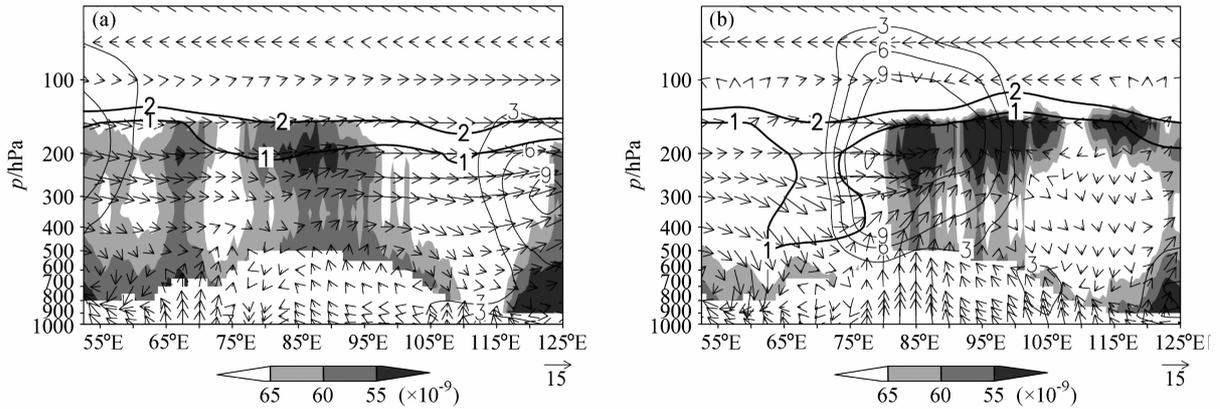


图7 (a) 西部型(沿 35°N) 和 (b) 东部型(沿 35°N) 南亚高压中心的 O<sub>3</sub> 浓度(阴影)、风场(矢量箭头, 水平风速单位: m · s<sup>-1</sup>, 垂直风速单位: -10<sup>-2</sup>Pa · s<sup>-1</sup>)、南风(等值线)和位势涡度(粗实线, 单位: PVU) 纬向垂直分布

Fig. 7 Latitude cross section of the O<sub>3</sub> mixing ratio (shaded), vertical circulation (vector arrows, horizontal wind units: m · s<sup>-1</sup>, vertical wind units: -10<sup>-2</sup>Pa · s<sup>-1</sup>), south wind (isolines), and potential vorticity (thick solid lines, units: PVU) during the (a) west phase (along 35°N) and (b) east phase (along 35°N) oscillation of the South Asia high

要由上升气流和偏南风控制。这与 Tobo et al. (2008) 等发现的与对流层上层季风反气旋相关的 O<sub>3</sub> 低值相吻合。

图 7 给出了 2006 年 7 月典型的西部型和东部型条件下, 南亚高压中心的 O<sub>3</sub> 浓度、风场纬向垂直分布。从图 7 可以看出, 西部型(图 7 a) 条件下, O<sub>3</sub> 低值中心主要位于对流层中上层的青藏高原上空, 另外在南亚高压中心也存在一个 O<sub>3</sub> 低值中心。南亚高压中心无明显的上升气流, 主要由偏北风控制。相比较, 东部型(图 7 b) 条件下,

O<sub>3</sub> 低值中心偏东、强度强, 主要位于南亚高压中心。南亚高压中心主要由上升气流和偏南风控制。南亚高压控制区对流层低层强对流发展, 来自对流层低层及低纬度地区含低浓度 O<sub>3</sub> 的空气被输送到高压中心, 并受到西风急流的阻挡, 在南亚高压中心堆积, 形成高压中心 O<sub>3</sub> 低值。

图 8 给出了 2006 年 7 月典型的西部型和东部型条件下, 100 hPa 等压面上 O<sub>3</sub> 浓度和风场水平分布。从图 8 可以看出, 西部型(图 8 a) 条件下, O<sub>3</sub> 低值中心强度较弱, 浓度小于 120 × 10<sup>-9</sup>

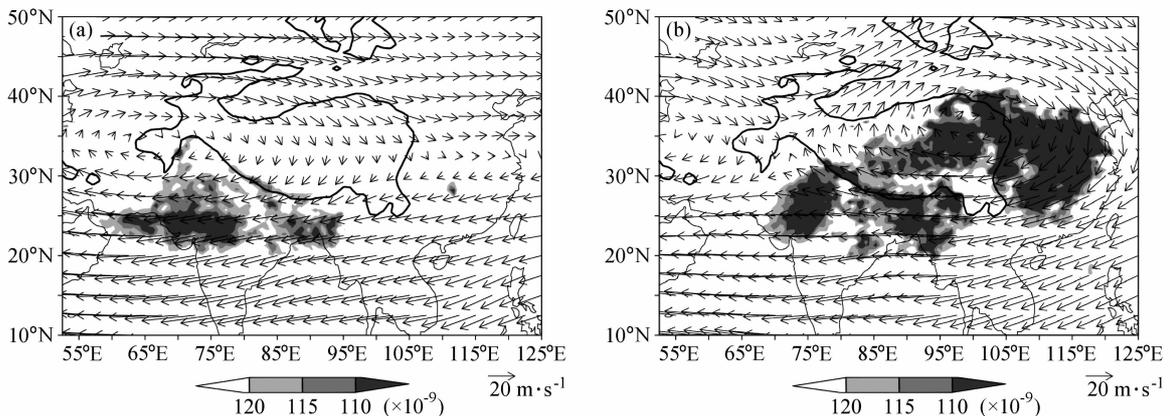


图 8 (a) 西部型和 (b) 东部型南亚高压条件下, 100 hPa 等压面上 O<sub>3</sub> 浓度 (阴影)、风场 (矢量箭头) 水平分布。粗实线表示青藏高原

Fig. 8 Horizontal distributions of the Ozone Monitoring Instrument (OMI) daily mean O<sub>3</sub> mixing ratio (shaded), wind (vector arrows) at the height of 100 hPa during (a) west phase and (b) east phase oscillation of the South Asia high. The thick solid line denotes the Tibetan Plateau

的低值区位于青藏高原西南侧, 95°E 以西、30°N 以南, 范围较小。O<sub>3</sub> 低值区主要由东北风控制, 低纬度地区含低浓度 O<sub>3</sub> 的空气被阻挡在青藏高原南侧。东部型 (图 8 b) 条件下, O<sub>3</sub> 低值中心强度较强, 浓度小于  $120 \times 10^{-9}$  的低值区位于青藏高原东部, 范围较大,  $120 \times 10^{-9}$  O<sub>3</sub> 等值线可以北伸至 40°N 左右。O<sub>3</sub> 低值区主要由偏东风控制, 南亚高压区域东南气流较强, 低纬度地区含低浓度 O<sub>3</sub> 的空气向高纬度地区输送。

由以上分析可以得出, 南亚高压中心强对流发展和对流层顶的抬升是对流层中上层高压中心 O<sub>3</sub> 低值形成的主要原因, 决定了 O<sub>3</sub> 低值中心的强度和高度; 而水平输送及南亚高压北侧西风急流也会影响 O<sub>3</sub> 浓度分布和 O<sub>3</sub> 低值区的位置。

## 7 结论与讨论

本文采用 OMI O<sub>3</sub> 廓线资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 研究了南亚高压东西振荡与青藏高原 O<sub>3</sub> 分布的关系, 得到如下结果:

(1) 在西 (东) 部型南亚高压条件下, 青藏高原地区大气、对流层和平流层 O<sub>3</sub> 柱总量低值中心均偏西 (东), 位于青藏高原西 (东) 部。青藏高原 O<sub>3</sub> 低值中心与南亚高压中心相对应, 青藏高原 O<sub>3</sub> 分布与南亚高压东西振荡存在密切的关系。

(2) 南亚高压控制区强对流的发展把对流层

低层及低纬度地区含低浓度 O<sub>3</sub> 的空气输送到高压中心, 并受到西风急流的阻挡, 在南亚高压中心堆积, 形成高压中心 O<sub>3</sub> 低值。

(3) 在西部型南亚高压条件下, 低纬地区含低浓度 O<sub>3</sub> 的空气被阻挡在高原南侧, O<sub>3</sub> 浓度低值区偏南。在东部型南亚高压条件下, 从低纬度经中南半岛西北方向孟加拉湾带来的低纬度低浓度 O<sub>3</sub>, 在青藏高原上空堆积, 形成 O<sub>3</sub> 低值中心, O<sub>3</sub> 浓度低值区偏北。

因此, 夏季南亚高压东西振荡与青藏高原上空 O<sub>3</sub> 低值中心变化存在密切的关系, 对两者之间相互关系的研究, 有利于深入理解南亚高压东西振荡的形成机制并提高我国气候预测的准确性。

致谢 感谢 NCEP/NCAR 提供再分析资料。

## 参考文献 (References)

- 卞建春, 李维亮, 周秀骥. 1997. 青藏高原及其临近地区风场结构季节性变化的特征分析 [M] // 周秀骥. 中国地区大气臭氧及其对气候环流的影响. 北京: 气象出版社, 257-273. Bian Jianchun, Li Weiliang, Zhou Xiujie. 1997. Analysis of the seasonal variation feature of the wind structure over Tibetan Plateau and its surroundings [M] // Zhou Xiujie. Atmospheric Ozone and Its Impact on Climate and Environment in China (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 257-273.
- 蔡兆男, 王永, 郑向东, 等. 2009. 利用探空资料验证 GOME 卫星臭氧数据 [J]. 应用气象学报, 20 (3): 337-345. Cai Zhao-

- nan, Wang Yong, Zheng Xiangdong, et al. 2009. Validation of GOME ozone profiles and tropospheric column ozone with ozone Sonde over China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 20 (3): 337-345.
- Cui H, Zhao C, Qin Y, et al. 2004. An estimation of ozone flux in astratosphere troposphere exchange event [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49: 167-174.
- Farman J C, Gardiner B G, Shanklin J D. 1985. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal  $\text{ClO}_x/\text{NO}_x$  interaction [J]. *Nature*, 315: 207-210.
- 付超, 李维亮, 周秀骥. 1997. 夏季青藏高原上空臭氧总量低值区形成的模拟实验 [M] //周秀骥. 中国地区大气臭氧及其对气候环流的影响. 北京: 气象出版社, 274-284. Fu Chao, Li Weiliang, Zhou Xiuji. 1997. Numerical simulation of the formation of ozone valley over Tibetan Plateau in summer [M] // Zhou Xiuji. *Atmospheric Ozone and Its Impact on Climate and Environment in China* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 274-284.
- Liu Yu, Li Weiliang, Zhou Xiuji, et al. 2003. Mechanism of formation of the ozone valley over Tibetan Plateau in summer-Transport and chemical process of ozone [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 20 (1): 103-109.
- Liu X, Chance K, Sioris C E, et al. 2005. Ozone profile and tropospheric ozone retrievals from the Global Ozone Monitoring Experiment, Algorithm description and validation [J]. *J. Geophys. Res.*, 110: D20307.
- Liu Yi, Wang Yong, Liu Xiong, et al. 2009. Tibetan middle tropospheric ozone minimum in June discovered from GOME observations [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36: L05814.
- Manney G L, Froidevaux L, Waters J W, et al. 1994. Chemical depletion of ozone in the Arctic lower stratosphere during winter 1992-1993 [J]. *Nature*, 370: 429-434.
- Reiter E R, Gao Dengyi. 1982. Heating of the Tibet Plateau and movements of the south Asian high during spring [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110: 1694-1711.
- 任福民, 王梅华, 周秀骥, 等. 1998. 近十五年全球臭氧变化 [J]. *气象学报*, 56 (4): 485-492. Ren Fumin, Wang Meihua, Zhou Xiuji, et al. 1998. Study on changes of ozone over the globe during the past 15 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 56 (4): 485-492.
- Stolarski R S, Bojkov R D, Bishop L, et al. 1992. Measure trends in stratospheric ozone [J]. *Science*, 256: 342-349.
- Tobo Y, Iwasaka Y, Zhang D, et al. 2008. Summertime ozone valley over the Tibetan Plateau derived from ozonesondes and EP/TOMS data [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35: L16801.
- 王喜红, 李兴生. 1998. 中国地区对流层臭氧变化和分布的数值研究 [J]. *气象学报*, 56 (3): 333-348. Wang Xihong, Li Xingsheng. 1998. A numerical study of the variations and distributions of tropospheric ozone and its precursors over China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 56 (3): 333-348.
- 张琼, 钱永甫, 张学洪. 2000. 南亚高压的年际和年代际变化 [J]. *大气科学*, 24 (1): 67-78. Zhang Qiong, Qian Yongfu, Zhang Xuhong. 2000. Interannual and interdecadal variations of the South Asia high [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 24 (1): 67-78.
- 周任君, 陈月娟. 2005. 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 [J]. *中国科学技术大学学报*, 35 (6): 899-908. Zhou Renjun, Chen Yuejuan. 2005. Ozone variations over the Tibetan and Iranian Plateaus and their relationship with the South Asia high [J]. *Journal of University of Science and Technology of China* (in Chinese), 35 (6): 899-908.
- Zhou Xiuji, Luo Chao. 1995. Ozone valley over Tibetan Plateau [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 8 (4): 505-506.
- 周秀骥, 李维亮, 陈隆勋, 等. 2004. 青藏高原地区大气臭氧变化的研究 [J]. *气象学报*, 62 (5): 513-527. Zhou Xiuji, Li Weiliang, Chen Longxun, et al. 2004. Study of ozone change over Tibetan Plateau [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (5): 513-527.
- Zou Han. 1996. Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 23: 1029-1032.
- Zou H, Gao Y. 1997. Vertical ozone profile over Tibet using Sage I and II data [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 14: 505-512.