

青藏高原和北美夏季臭氧谷垂直结构和形成机制的比较

郭栋^{①*}, 徐建军^{①②**}, 苏昱丞^①, 施春华^①, 刘煜^③, 李维亮^③^① 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;^② 广东海洋大学海洋与气象学院, 广东 湛江 524088;^③ 中国气象科学研究院, 北京 10081

* 联系人, E-mail: dongguo@nuist.edu.cn

** 联系人, E-mail: gmuxujj@163.com

2016-03-15 收稿, 2016-05-22 接受

国家自然科学基金资助项目(41675039; 41305039; 41375047; 91537213; 41641042; 41375092; 41475140); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD); 国家留学基金

摘要 利用 MLS 卫星资料和 ERA-Interim 再分析资料, 比较了青藏高原和北美夏季臭氧谷的垂直结构和形成机制。结果如下: 青藏高原夏季臭氧谷在垂直方向上存在两个低值中心, 一个中心位于对流层顶附近, 强度约为-15 DU, 形成原因主要为水平辐散, 另一个中心位于上平流层, 强度约为-1 DU, 形成原因可能为光化学反应参与的氯自由基的催化损耗。北美夏季臭氧谷仅存在一个低值中心, 位于对流层顶附近, 该中心强度约为-5 DU, 其形成的主要原因是水平辐散。

关键词臭氧谷;
青藏高原;
北美;
垂直结构;
形成机制

臭氧层不仅对大气的热力结构起到重要作用 (Andrews et al., 1987), 而且也是生态系统的保护伞, 如果没有臭氧层, 地球上的生物会暴露在强烈的太阳紫外辐射下, 无法生存 (Fuhrer and Booker, 2003)。Molina and Rowland (1974) 发现氯氟烃能够使臭氧层变薄。而且, 氯氟烃可以在大气中停留上百年。但是, 当时他们的工作没有得到科学界的重视。直到南极臭氧洞的发现, 臭氧变化才得到了更多的关注 (Farman et al., 1985)。而南极臭氧洞中氯的高含量证实了 Molina and Rowland (1974) 的理论, 并导致了 1987 年蒙特利尔破坏臭氧层物质管制议定书的签署。后来, Molina 和 Rowland 因此获得了诺贝尔奖。接着, Newman et al. (1997) 发现了北极的臭氧损耗, Manney et al. (2011) 发现了北极的臭氧洞现象。使得臭氧损耗研究近年来持续处于地球科学界和化学界的研究前沿和热点。

事实上, 臭氧损耗并不只出现在高纬度地区。Zhou and Luo (1994) 利用 1979—1991 年平均的

TOMS 卫星资料发现在夏半年 (4—9 月) 青藏高原上空的臭氧总量比同纬度的中国东部地区要低 5 DU 以上, 称其为青藏高原臭氧谷。Zou (1996) 确认了该臭氧谷的存在。Bian et al. (2006) 发现在冬季有时也存在青藏高原臭氧低值区, Liu et al. (2010) 研究了冬季青藏高原臭氧低值的形成机制。

周秀骥等 (1995) 最早推测了夏季青藏高原臭氧谷的形成机制: 局地上升运动导致的物质输送和其相关的化学过程是其形成的原因。大多数工作认为与大尺度环流有关的动力输运对上对流层下平流层区 (UTLS) 的青藏高原臭氧谷起到主要作用, 而化学作用较弱 (郭世昌和徐裕华, 1986; Liu et al., 2003, 2009; 苏绍基和王卫国, 2004; 周任君和陈月娟, 2005; Tian et al., 2008; Bian et al., 2011; Guo et al., 2012; 杨双艳等, 2012; 苏昱丞等, 2016; Guo et al., 2017)。Zou (1996) 认为地表热通量与其密切相关, 而热力过程和动力过程是统一的。Tian et al. (2008) 和 Bian et al. (2011) 认为高原相对于同纬度

引用格式: 郭栋, 徐建军, 苏昱丞, 等, 2017. 青藏高原和北美夏季臭氧谷垂直结构和形成机制的比较 [J]. 大气科学学报, 40(3): 412-417.

Guo D, Xu J J, Su Y C, et al., 2017. Comparison of vertical structure and formation mechanism of summer ozone valley over the Tibetan Plateau and North America [J]. Trans Atmos Sci, 40(3): 412-417. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160315001. (in Chinese).

地区排开了更多的空气,即高原地表以下臭氧为零,而相同海拔高度上同纬度其他地区仍存在臭氧,因此也是臭氧谷形成的原因之一。

青藏高原臭氧谷最强的中心位于 UTLS 区,以前的工作也基本集中在该区域。然而,Guo et al. (2012)在利用 SAGEII 卫星资料研究南亚高压对 UTLS 臭氧谷的作用时,显示平流层上层也存在一个次强的低值中心。但是,当时以为是系统误差。后来,Guo et al. (2015)在卫星资料 MLS 中确认了夏季青藏高原臭氧谷的双心结构,并推测化学过程可能起到重要作用。万凌峰等(2017)模拟了夏季青藏高原臭氧谷的双心结构。

而落基山对北美气候的作用,类似于青藏高原对亚洲气候的作用。在夏季对流层顶附近,二者上空均会产生高压反气旋。这种环流系统可能会对臭氧分布产生类似的影响。因此,本文比较了北美臭氧谷与青藏高原臭氧谷的垂直特征与形成机制。

1 资料和方法

微波临边探测仪 MLS(Microwave Limb Sounder)搭载于美国宇航局(NASA)的极轨卫星 Aural。MLS 对 118 GHz、190 GHz、240 GHz、640 GHz 和 2.5 THz 进行微波临边探测,通过反演可获得 UTLS 区的大气成分、温度、冰的相对湿度以及卷云冰和位势高度等气候变化相关的 17 种大气参数的垂直廓线(Waters et al., 2006)。关于 MLS 反演的具体说明可参见相关文献(Livesey et al., 2006; Pumphrey et al., 2007)。MLS 探测器每隔 24.7 s 从地表到 90 km 高度范围在轨道面上星下点扫描一次,扫描宽度约 90 km,每天大约有 3 494 次采样,可覆盖全球 82°S~82°N 的纬度范围(Waters et al., 2006)。水平格点沿着运行轨道每 1.5°间隔分布一条廓线,每个轨道有 240 条廓线,但各个纬度间并不是等间距的。取 2005—2013 年夏季(6—8 月)臭氧、一氧化氯、氯化氢和二氧化氮的数据,垂直分辨率约 2.5 km,水平分辨率大约 300~500 km。根据 Livesey et al. (2006)给出的质量控制方法,对逐日轨道数据进行了预处理,剔除了异常值。所有的 MLS 二级的数据都可以从 NASA 的戈达德太空飞行中心的数据和信息服务中心(GSFC-DISC)下载。

欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA-interim 为新一代欧洲中心再分析资料做准备的过渡期再分析资料,采用四维变分方法,有更高的水平分辨率,更好的背景误差约束以及卫星辐射资料的变分偏差修正,并改良了快速辐射传输算法

(Dee et al., 2011)。时间跨度为 1979 年开始,至今不断更新。本文所使用的是 2005—2013 年夏季(6—8 月)的风场资料,垂直方向分为 37 个标准气压层,高度范围为 1 000~1 hPa,水平分辨率为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 。

因为很多大气成分浓度的等值线在中纬度地区近似平行于纬线,为了便于显示大气成分浓度与同纬度其他地区的差别,本文使用了纬向偏差。大气成分浓度(量)的纬向偏差等于大气成分浓度(量)与其纬圈平均的差值。而大气成分在不同高度上浓度往往差异很大,为了清楚地显示纬向偏差的垂直特征,引入纬向偏差率。大气成分浓度(量)的纬向偏差率等于大气成分浓度(量)的纬向偏差与大气成分浓度(量)的纬圈平均的比值,单位为“1”。垂直积分的臭氧量使用多布森单位(DU)。

2 青藏高原和北美夏季臭氧谷垂直结构的比较

臭氧浓度的纬向偏差率显示了夏季青藏高原和北美上空臭氧谷的垂直结构(图 1)。青藏高原上空,夏季臭氧谷呈现双心结构,分别位于上对流层和下平流层区(UTLS)以及上平流层区(图 1a)。而北美上空仅存在一个中心,位于 UTLS 区(图 1b)。北美夏季臭氧谷的中心高度约 200 hPa(图 1b)较青藏高原臭氧谷下部中心的高度(约 100 hPa,图 1a)低。夏季青藏高原臭氧谷 UTLS 区的低值中心强度较强,臭氧纬向偏差率达到-0.3(图 1a),215.4~26.1 hPa 垂直积分后臭氧纬向偏差的中心强度为-15 DU(图略),而上平流层中心的强度较弱,臭氧纬向偏差率达到-0.01(图 1a),26.1~1 hPa 垂直积分后臭氧纬向偏差的中心强度为-1 DU(图略)。而夏季北美臭氧谷的中心强度为臭氧纬向偏差率-0.18(图 1b),215.4~26.1 hPa 垂直积分后臭氧纬向偏差的中心强度为-5 DU(图略),比夏季青藏高原臭氧谷下部中心强度弱。

3 青藏高原和北美夏季臭氧谷形成机制的比较

青藏高原夏季臭氧谷 UTLS 区的中心和北美夏季臭氧谷主要是由局地反气旋产生的臭氧通量辐散造成的。如图 2 所示,夏季青藏高原上空和北美上空,UTLS 区均存在反气旋。青藏高原上空的反气旋较北美上空反气旋的范围大得多,且青藏高原上空反气旋对应的臭氧通量辐散明显较北美上空的臭氧通量辐散强。夏季青藏高原臭氧谷区 100 hPa 的

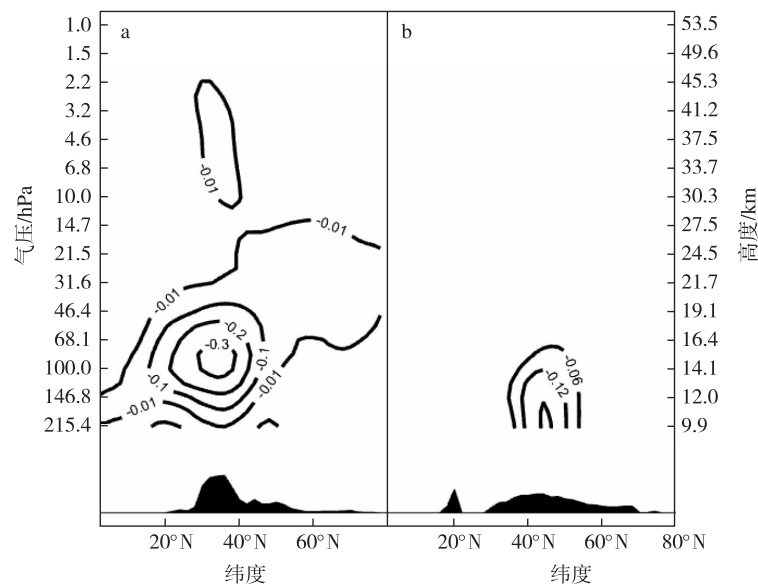


图 1 2005—2013 年平均的青藏高原 (a; 75~105°E 平均) 和北美 (b; 90~110°W 平均) 夏季臭氧纬向偏差率 (单位:1; 阴影代表地形)

Fig.1 2005—2013 mean summer zonal ozone deviation rate over (a) Tibetan Plateau (75—105° E mean) and (b) North America (90—110° W mean); units : 1 ; shading areas indicate terrain

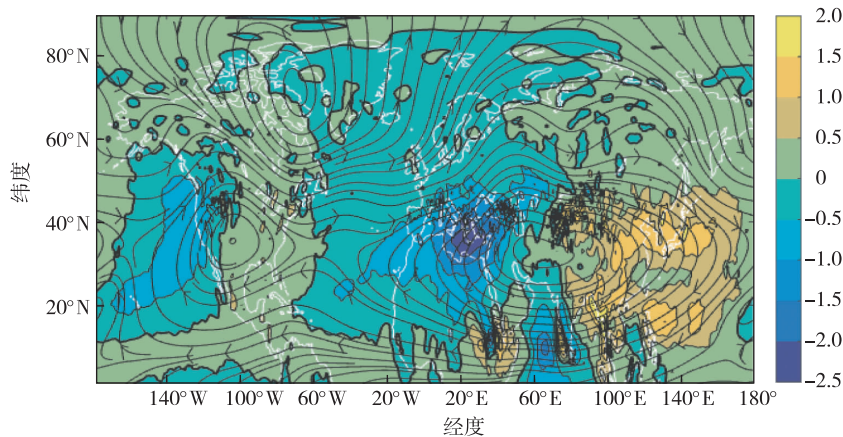


图 2 2005—2013 年夏季平均的 100 hPa 环流 (流线) 和臭氧通量散度 (阴影; 单位: $10^{-12} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.2 2005—2013 mean circulation (vector) and ozone flux divergence (shading; units: $10^{-12} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) in summer at 100 hPa

臭氧通量散度能达到 $1 \times 10^{-12} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 而北美臭氧谷区的臭氧通量散度虽然以正值为主, 但均小于 $5 \times 10^{-13} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 这是夏季青藏高原臭氧谷 UTLS 区的低值中心强度较北美夏季臭氧谷中心强度强的原因。综上, 青藏高原夏季臭氧谷 UTLS 区的中心和北美夏季臭氧谷的形成机制是类似的, 均以动力过程为主。

夏季青藏高原臭氧谷存在上平流层中心, 而北美的上平流层并不存在臭氧谷的中心。夏季青藏高原臭氧谷上部中心的形成机制可能与化学反应有关。如图 3 所示, 在 10 hPa 上, 青藏高原区一氧化

氯和氯化氢的浓度较同纬度其他地区高, 而二氧化氮的浓度较同纬度其他地区低。而北美上空, 一氧化氯和氯化氢的浓度较同纬度则较其他地区低。青藏高原区一氧化氯和氯化氢的高值中心表明活性氯对臭氧的催化损耗可能较强, 而北美一氧化氯和氯化氢的低值中心则指示了活性氯对臭氧的催化损耗可能较弱。另外, 青藏高原区二氧化氮浓度较低。而二氧化氮能够和活性氯反应产生较稳定的物质, 导致活性氯的失活。因此, 更使得青藏高原区活性氯对臭氧的催化损耗较同纬度其他地区强。综上, 化学过程可能导致了青藏高原臭氧谷上平流层中心的形成。

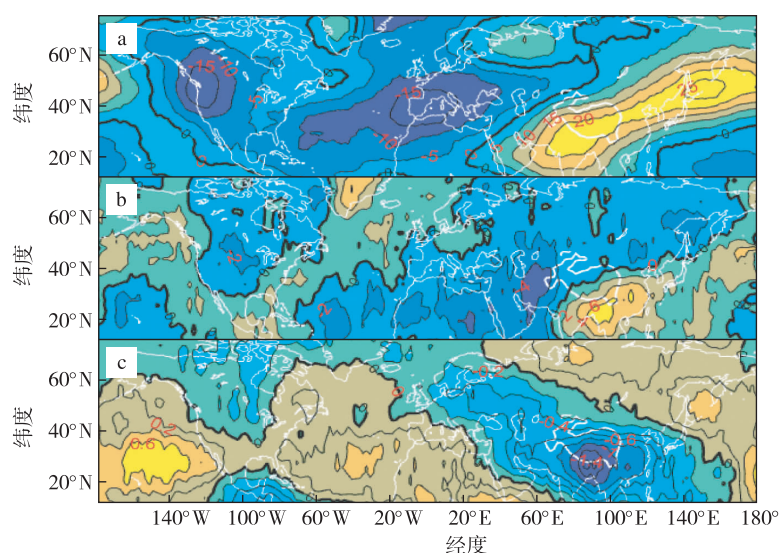


图3 2005—2013年夏季平均10 hPa一氧化氯(a)、氯化氢(b)和二氧化氮(c)浓度纬向偏差(单位: $10^{-12} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)

Fig.3 2005—2013 zonal mean deviation of (a) chlorine monoxide, (b) hydrogen chloride and (c) nitrogen dioxide in summer at 10 hPa (units: $10^{-12} \text{ mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)

4 结论

利用MLS卫星资料和ERA-Interim再分析资料,分析比较了青藏高原和北美夏季臭氧谷的垂直结构和形成机制。结果表明:

1) 青藏高原夏季臭氧谷在垂直方向上存在双心结构,而北美夏季臭氧谷只存在一个中心。

2) 青藏高原夏季臭氧谷的下部中心(强度约为-15 DU)和北美臭氧谷的中心(强度约为-5 DU)位于上对流层和下平流层区,其主要是由局地反气旋的辐散造成的。

3) 青藏高原夏季臭氧谷的上部中心位于上平流层,强度约为-1 DU,形成原因可能为氯自由基的催化损耗。

参考文献(References)

- Andrews D G, Holton J R, Leovy C B, 1987. Middle atmosphere dynamics [M]. San Diego: Academic.
- Bian J, Wang G, Chen H, et al., 2006. Ozone mini-hole occurring over the Tibetan Plateau in December 2003 [J]. Chin Sci Bull, 51(7): 885-888.
- Bian J, Yan R, Chen H, et al., 2011. Formation of the summertime ozone valley over the Tibetan Plateau; The Asian summer monsoon and air column variations [J]. Adv Atmos Sci, 28(6): 1318-1325.
- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J, et al., 2011. The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 137(656): 553-597.
- Farman J C, Gardiner B G, Shanklin J D, 1985. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction [J]. Nature, 315(6016): 207-210.
- Fuhrer J, Booker F, 2003. Ecological issues related to ozone; agricultural issues [J]. Environ Int, 29(2): 141-154.
- Guo D, Wang P, Zhou X, et al., 2012. Dynamic effects of the South Asian High on the ozone valley over the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteorol Sin, 26(2): 216-228.
- Guo D, Su Y, Shi C, et al., 2015. Double core of ozone valley over the Tibetan Plateau and its possible mechanisms [J]. J Atmos Sol-Terrl Phy, 130/131: 127-131.
- Guo D, Su Y, Zhou X, et al., 2017. Evaluation of trend uncertainty of summer ozone valley over Tibetan Plateau in three reanalysis datasets [J]. J Meteor Res, 31(2): 431-437. doi: 10. 1007/s13351-017-6058-x.
- 郭世昌, 徐裕华, 1986. 大地形加热对亚洲上空臭氧经向分布不连续现象的可能贡献 [J]. 云南大学学报: 自然科学版, 8(4): 87-93.
- Guo S, Xu Y, 1986. The possible contribution of the large scale topographic heating to the discontinuous feature of ozonosphere meridional effect over Asia [J]. J Yunnan Univ (Nat Sci Ed), 8(4): 87-93. (in Chinese).
- Liu C, Liu Y, Cai Z, et al., 2010. Dynamic formation of extreme ozone minimum events over the Tibetan Plateau during northern winters 1987—2001 [J]. J Geophys Res, 115(D18): 18311.

- Liu Y, Li W, Zhou X, et al., 2003. Mechanism of formation of the ozone valley over the Tibetan Plateau in summer-transport and chemical process of ozone[J]. *Adv Atmos Sci*, 20(1): 103-109.
- Liu Y, Wang Y, Liu X, et al., 2009. Tibetan middle tropospheric ozone minimum in June discovered from GOME observations[J]. *Geophys Res Lett*, 36(5): 126-127.
- Livesey N J, Kovalenko L J, Salawitch R J, et al., 2006. EOS Microwave Limb Sounder observations of upper stratospheric BrO: Implications for total bromine[J]. *Geophys Res Lett*, 33(20): 1-5.
- Manney G L, Santee M L, Rex M, et al., 2011. Unprecedented Arctic ozone loss in 2011[J]. *Nature*, 478(7370): 469-475.
- Molina M J, Rowland F S, 1974. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom catalyzed destruction of ozone[J]. *Nature*, 249(5460): 812-820.
- Newman P A, Gleason J F, McPeters R D, et al., 1997. Anomalous low ozone over the Arctic[J]. *Geophys Res Lett*, 24(22): 2689-2692.
- Pumphrey H C, Filipiak M J, Livesey N J, et al., 2007. Validation of middle-atmosphere carbon monoxide retrievals from Microwave Limb Sounder on Aura[J]. *J Geophys Res*, 112(D24): 177-180.
- 苏绍基, 王卫国, 2004. 大气臭氧层变化与南亚高压活动关系的探讨[J]. *云南大学学报: 自然科学版*, 22(4): 293-296. Su S, Wang W, 2004. The relationship between the total ozone variation in Asia and the South Asian high pressure[J]. *J Yunnan Univ (Nat Sci Ed)*, 22(4): 293-296. (in Chinese).
- 苏昱丞, 郭栋, 郭胜利, 等, 2016. 未来百年夏季青藏高原臭氧变化趋势及可能机制[J]. *大气科学学报*, 39(3): 309-317. Su Y C, Guo D, Guo S L, et al., 2016. Ozone trends over the Tibetan Plateau in the next 100 years and their possible mechanism[J]. *Trans Atmos Sci*, 39(3): 309-317. (in Chinese).
- Tian W, Chipperfield M, Huang Q, 2008. Effects of the Tibetan Plateau on total column ozone distribution[J]. *Tellus B*, 60(4): 622-635.
- 万凌峰, 郭栋, 刘仁强, 等, 2017. WACCM3 对夏季青藏高原臭氧谷双心结构的模拟性能评估[J]. *高原气象*, 36(1): 57-66. Wan L, Guo D, Liu R, et al., 2017. Evaluation of the WACCM3 performance on simulation of the double core of ozone valley over the Qinghai-Xizang Plateau in summer[J]. *Plateau Meteorol*, 36(1): 57-66. (in Chinese).
- Waters J W, Froidevaux L, Harwood R S, et al., 2006. The Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS MLS) on the Aura Satellite[J]. *IEEE Trans Geosci Remote S*, 44(5): 1075-1092.
- 杨双艳, 周顺武, 张人禾, 等, 2012. 青藏高原对流层顶高度与臭氧总量及上升运动的耦合关系[J]. *大气科学学报*, 35(4): 438-447. Yang S, Zhou S, Zhang R, et al., 2012. Coupling relationship between tropopause height and total ozone as well as ascending motion over the Tibetan Plateau[J]. *Trans Atmos Sci*, 35(4): 438-447. (in Chinese).
- 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 R, Chen Y, 2005. Ozone variations over the Tibetan and Iranian Plateau and their relationship with the South Asian High[J]. *J Univ Sci Technol China*, 35(6): 899-908. (in Chinese).
- Zhou X, Luo C, 1994. Ozone valley over Tibetan plateau[J]. *Acta Meteorol Sin*, 8(4): 505-506.
- 周秀骥, 罗超, 李维亮, 等, 1995. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心[J]. *科学通报*, 40(15): 1396-1398. Zhou X, Luo C, Li W, et al., 1995. The change of total ozone in China and the low value center of the Tibetan Plateau[J]. *Chin Sci Bull*, 40(15): 1396-1398. (in Chinese).
- Zou H, 1996. Seasonal variation and trends of TOMS ozone over Tibet[J]. *Geophys Res Lett*, 23(9): 1029-1032.

Comparison of vertical structure and formation mechanism of summer ozone valley over the Tibetan Plateau and North America

GUO Dong¹, XU Jianjun^{1,2}, SU Yuchen¹, SHI Chunhua¹, LIU Yu³, LI Weiliang³

¹ Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center for Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

² College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China;

³ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 10081, China

Since ozone hole in the polar region has been found, ozone depletion aroused extensive concern all over the world. The ozone valley over the Tibetan Plateau (OVTP) and over North America (OVNA) are seasonal ozone lows out of the polar region. They occurred both in middle latitudes and in summer half year. In order to compare their vertical structure and formation mechanism, we calculated ozone zonal deviation rate to show vertical struc-

ture of ozone valley over the Tibetan Plateau (OVTP) and North America, using MLS (Microwave Limb Sounder) data from 2005 to 2013, where ozone zonal deviation rate is ratio of ozone zonal deviation to ozone zonal mean, and ozone zonal deviation equals to ozone concentration minus ozone zonal mean. The ozone zonal deviation rate indicates that there are two centers of OVTP and one center of OVNA. One center of OVTP is located in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS) with peak ozone zonal deviation rate of -0.3 , the other center is located in the upper stratosphere with peak ozone zonal deviation rate of -0.01 . The center of OVNA is also located in the UTLS region with peak value of -0.18 . The integration of zonal deviation shows that the UTLS center of OVTP with -15 DU is the strongest, the UTLS center of OVNA with -5 DU is in the middle and the upper center of OVTP with -1 DU is the weakest. Therefore, the vertical structure of ozone valley is clear. Then we analyzed the dynamic and chemical mechanism of the ozone valley. Summer circulation calculated from ERA-interim reanalysis data and summer ozone flux divergence calculated from ERA-interim data show that anticyclones are located over Tibetan Plateau and North America in the UTLS region. The anticyclone domain over the Tibetan Plateau is larger than that over North America. Moreover, corresponding ozone flux divergence over the Tibetan Plateau ($1 \times 10^{-12} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) is more robust than that over North America ($5 \times 10^{-13} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), which is the main reason why UTLS center of OVTP is stronger than that of OVNA. UTLS center of OVTP, UTLS center and the only center of OVNA are mainly caused by dynamic processes. However, the MLS data implies chemical reaction may play a role in the upper center of OVTP. Zonal deviation of chlorine monoxide and hydrogen chloride are negative while zonal deviation of nitrogen dioxide is positive at 10 hPa over the Tibetan Plateau, which means chlorine monoxide and hydrogen chloride concentration are higher over the Tibetan Plateau than that in the same latitudes. Besides, nitrogen dioxide concentration are lower over the Tibetan Plateau than that in the same latitudes. Higher chlorine monoxide and hydrogen chloride concentration imply that chlorine catalytic reactions make ozone loss stronger over the Tibetan Plateau. The lower nitrogen dioxide concentrations may slow the reaction which deactivates reactive chlorine into nonreactive chlorine and may strengthen the chlorine catalytic reactions. Consequently, chemical processes may have an effect on the upper center of OVTP. To sum up, there are two centers of OVTP and only one center of OVNA. UTLS center of OVTP with -15 DU is the strongest, the UTLS center of OVNA with -5 DU is in the middle and the center of OVTP in the upper stratosphere with -1 DU is the weakest. UTLS center of OVTP, UTLS center and the only center of OVNA are mainly caused by dynamic processes. However, chemical processes may have an effect on the upper center of OVTP.

ozone valley; Tibetan Plateau; North America; vertical structure; formation mechanism

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20160315001

(责任编辑:张福颖)