

卞建春, 严仁嫦, 陈洪滨. 2011. 亚洲夏季风是低层污染物进入平流层的重要途径 [J]. 大气科学, 35 (5): 897–902. Bian Jianchun, Yan Renchang, Chen Hongbin. 2011. Tropospheric pollutant transport to the stratosphere by Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (5): 897–902.

亚洲夏季风是低层污染物进入平流层的重要途径

卞建春¹ 严仁嫦^{1,2} 陈洪滨¹

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

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘 要 夏季亚洲季风区是对流层低层水汽和污染物进入全球平流层的一个重要通道, 自然或人为污染物通过该通道进入平流层后对臭氧层的破坏以及全球气候环境的影响, 成为目前国际科学界关注的热点问题。早先观点认为: 夏季青藏高原是对流层低空物质向平流层输送的一个重要渠道。然而, 越来越多的观测表明: 包括青藏高原在内的整个亚洲夏季风通过强对流的快速输送以及大尺度输送过程可以把低层大气物质输送到全球平流层。在地面物质进入平流层的过程中有两个关键过程, 一是垂直快速输送的对流活动, 这对于短寿命化学成分非常重要, 二是缓慢的大尺度反气旋输送和限制作用。但是, 目前对于亚洲季风区不同源区的贡献还有很大的争议。

关键词 亚洲夏季风 进入平流层通道 亚洲污染物 气候环境效应

文章编号 1006–9895 (2011) 05–0897–06

中图分类号 P421

文献标识码 A

Tropospheric Pollutant Transport to the Stratosphere by Asian Summer Monsoon

BIAN Jianchun¹, YAN Renchang^{1, 2}, and CHEN Hongbin¹

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Asia is currently the fastest growing economy region and is also the most concentrated population area in the world, and consequently, regional and potential global climate and environment issues caused by Asian rapid economic development, become an important topic of concern in the scientific community. Originally, it was assumed that the Tibetan Plateau is a key region for the tropospheric air into the stratosphere in summer. However, recent satellite observations and numerical simulations suggested that the Asian summer monsoon is an important pathway for lower tropospheric water vapor and pollutions into the global stratosphere. These chemical mass will have important effect on the regional and global climate and environment through chemical and radiative processes in the stratosphere.

Key words Asian summer monsoon, pathway to the stratosphere, Asian pollutant, climate and environmental effect

1 引言

亚洲是目前世界上经济发展最快的地区, 也是

世界人口最集中的地区。一方面, 亚洲季风的异常尤其是大旱大涝等灾害性重大事件对亚洲经济社会的影响是亚洲地区以及世界关注的一个焦点; 另一

收稿日期 2010–10–08, 2011–01–25 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB428602, 国家自然科学基金资助项目 40830102、40775030

作者简介 卞建春, 男, 1969 出生, 研究员, 主要从事平流层大气研究。E-mail: bjc@mail.iap.ac.cn

方面,经济快速发展所带来的区域气候环境问题以及对全球气候环境的可能影响成为科学界关注的一个重要课题。已有研究初步表明,亚洲夏季风区是对流层低层水汽和污染物进入平流层的一个重要通道,其中青藏高原由于高大地形的作用因而在其中具有非常重要的作用(Randel et al., 2010; 陈斌等, 2010)。由于亚洲地区经济快速发展产生了大量污染物,这些污染物通过该通道进入平流层后对臭氧层的破坏以及全球气候环境的影响,成为目前国际科学界关注的热点问题。本文将综述亚洲夏季风在对流层污染物向全球平流层输送过程和作用以及可能存在的气候环境效应。

2 早先观点:夏季青藏高原是对流层低空物质向平流层输送的一个重要渠道

1994年,周秀骥等(1995)分析卫星观测资料,发现每年6~9月青藏高原上空存在一个明显的闭合臭氧低值中心,比同纬度地区低7%~11%,称为“夏季青藏高原臭氧低谷”。他们推测:“根据早年青藏高原气象学已有的研究结果,夏季青藏高原上空被热力作用产生的南亚高压所控制,高压内基本是对流活动。而且青藏高原气象学综合实验表明,夏季青藏高原基本为辐合区。依据局地环流的这些特点,认为青藏高原夏季是对流层低空物质向平流层输送的一个重要渠道。青藏高原周围数百公里范围的低空污染物有可能在夏季向青藏高原辐合,在高原上升到平流层底部,然后再向四周辐散。因此,对流层低浓度臭氧向平流层输送以及低空污染物在平流层引起的物理化学过程,都可能是引起臭氧总量异常降低的原因”(周秀骥等, 1995)。

根据平流层气溶胶和气体试验卫星(SAGE I & II)观测分析:与同纬度非山区相比较,青藏高原上空臭氧浓度在15.5~20.5 km高度偏低,最大差异在16.5 km附近(Zou and Gao, 1997)。1996年和1998年夏季在青藏高原上空开展的臭氧探空观测也表明,与同纬度其他站点相比较,青藏高原上空对流层顶附近臭氧浓度偏低(石广玉等, 2000; 郑向东等, 2000)。后来,更长时间序列的卤素掩星试验卫星(HALOE)和SAGE II卫星观测资料进一步证实,青藏高原上空臭氧含量在12~

22 km高度比同纬度带其他地区明显偏低(周任君和陈月娟, 2005; 林伟立和姚波, 2005)。同时还注意到,与青藏高原相似,伊朗高原上空臭氧浓度在这层大气中也明显偏低(周任君和陈月娟, 2005)。但是这一结果并未引起大家的足够关注,没有意识到整个亚洲夏季风在青藏高原臭氧低谷形成中的作用,也使国内学者错失了认识整个亚洲夏季风在对流层物质向全球平流层输送的重要性的先机。

根据再分析资料和青藏高原附近探空资料分析表明:夏季在对流层中低层,青藏高原及邻近地区为较强的辐合区,青藏高原上空整个对流层都是上升气流,且与南侧的孟加拉湾强上升区连成一片,组成巨大的季风垂直环流的上升支(卞建春等, 1997)。平流层—对流层质量交换通量的诊断分析也表明:每年夏季青藏高原与南侧的孟加拉湾北部上空对流层大气穿越对流层顶向平流层输送(丛春华等, 2001)。后来的研究进一步指出,这一大片穿越对流层顶向平流层的质量输送主要来自垂直输送项的贡献(樊文璇等, 2008),即对应于季风垂直环流的上升支,位于南亚高压控制区域的东南部。

这些研究进一步证实了上述推测,即:青藏高原夏季是对流层低空物质向平流层输送的一个重要渠道(周秀骥等, 2004)。

3 新观点:亚洲夏季风是对流层污染物进入全球平流层的一个重要通道

这些前期工作只关注青藏高原局地环流,而忽视了整个亚洲夏季风环流在其中的作用。近期卫星观测和数值模拟表明:亚洲夏季风是对流层污染物进入全球平流层的一个重要通道(Randel et al., 2010)。而青藏高原只是整个亚洲夏季风区的一个区域(Bian et al., 2010)。

微波临边探测器(MLS)卫星臭氧垂直分布观测表明:与同纬度地区相比,上对流层/下平流层(UTLS)臭氧浓度不仅在青藏高原上空偏低,而且在南亚高压控制的整个区域都明显偏低(Park et al., 2007)。图1给出了2005~2009年夏季100 hPa高度MLS卫星观测臭氧浓度分布,很明显南亚高压控制的整个区域是臭氧浓度低值区。由于伊朗高原与青藏高原都在南亚高压控制区域之内,因此这两个高原在UTLS区域臭氧浓度都明显低于同纬度其他地区(周任君和陈月娟, 2005)。最新研究表明:

夏季青藏高原臭氧低谷的形成有两个原因, 一是整个亚洲季风区 UTLS 臭氧浓度低于同纬度地区, 二是青藏高原大地形造成空气柱的部分缺失 (Bian et al., 2010)。臭氧总量卫星观测表明, 尽管夏季伊朗高原上空也是一个臭氧总量低值区 (周任君和陈月娟, 2005), 但是明显不如青藏高原上空臭氧总量低谷显著, 因为青藏高原大地形造成更大厚度的空气柱缺失。

卫星观测还表明: 夏季南亚高压控制区域还是水汽、CO、CH₄ 等对流层示踪物的闭合大值区域 (Jackson et al., 1998; Park et al., 2004; Li et al., 2005)。图 2 给出了 2005~2009 年夏季 100 hPa 高度 MLS 卫星观测 CO 和水汽浓度分布, 南亚高压对应于大值区域。数值模拟表明: 热带下平流层水汽浓度在北半球夏季比冬季大 60%, 而夏季输送到全球热带平流层水汽总量的大约 75% 发生在亚洲季风区 (Gottelman et al., 2004)。全球三维化学输送模式和排放表明: SO₂、CO、HCN 等能够到达 UTLS 的污染物绝大多数与夏季亚洲季风区有关 (Park et al., 2009; Randel et al., 2010)。

根据经典的全球对流层—平流层质量交换图像, 对流层空气由热带地区跨越对流层顶进入平流层, 然后在 Brewer-Dobson 全球环流控制下, 向极地方向和向中纬度对流层输送, 也就是说热带地区是对流层空气进入全球平流层的主要通道。但是由于热带地区下垫面主要是海洋, 对流层空气比较清洁, 由此进入全球平流层的对流层污染物贡献较小, 而在亚洲季风区, 由于中国、印度以及东南亚国家工农业发展比较迅速, 对流层污染物比较严重, 由此进入全球平流层的对流层污染物贡献显著 (Randel et al., 2010)。因此, 在对流层污染物进入全球平流层大气过程中, 亚洲夏季风是一个极为重要的途径。

4 亚洲夏季风输送机制之争

根据夏季亚洲季风区 UTLS 大气成分的分布特征, 提出两个主要输送机制, 但是目前对于它们的认识还很粗浅。一个机制是湿对流活动的快速输送, 深对流能够在数小时内将边界层污染物输送到

对流主流出 (main outflow) 高度, 这对于短寿命化学成分的输出尤其重要。但是, 目前对于亚洲季风区对流活动的分布尤其是主流出高度的认识, 具有很大的不确定性, 尤其是对流输送在对流层顶附近的作用具有很大争议 (Fu et al., 2006; Park et al., 2008)。另一个机制是南亚高压内大尺度反气旋的缓慢垂直输送和快速水平混合过程。轨迹模式分析表明: UTLS 区域强大的南亚高压使得该区域内的空气在较长时间内停留在反气旋控制中, 无法扩散到反气旋外面。造成反气旋中心对应于臭氧、水汽、CO 等的极值中心 (Li et al., 2005; Randel and Park, 2006; Park et al., 2007, 2008; Konopka et al., 2010)。

目前看法比较一致的观点是, 整个夏季亚洲季风区是对流层低层大气成分进入平流层的一个重要通道, 但是对于亚洲季风区不同区域排放源各自贡献的认识还存在很大的争议。基于臭氧与相关化学成分模式 (MOZART-4), Park et al. (2009) 通过标签 (TAG) 技术考察不同污染源区对 UTLS 区域 CO 分布的作用, 结果表明: 尽管东亚地区是地面 CO 最大的排放源区, 但是南亚排放源才是亚洲季风区 UTLS 区域 CO 分布的最重要原因。然而, Larmaque et al. (2011)^① 利用美国大气研究中心 (NCAR) 通用大气模式 (CAM) 模拟地面 SO₂ 排放对 UTLS 区域硫酸盐气溶胶分布的影响, 他们的模拟结果表明: 中国煤炭燃烧排放的 SO₂ 是夏季亚洲季风区 UTLS 区域硫酸盐气溶胶分布的最重要来源。CO 和 SO₂ 这两个大气成分在大气中将经历不同的化学过程, CO 几乎是不溶于水的, 主要受动力输送过程的控制; 而 SO₂ 是水溶性的, 还受到雨水过程的影响。尽管如此, 由于目前对夏季亚洲季风区低层大气成分向上输送机理认识的不足, 因而对亚洲季风区不同区域排放源贡献的认识还存在很大分歧。

5 亚洲夏季风输送污染物对全球气候环境变化的影响

卫星观测和地基观测表明过去十年平流层气溶胶有增加趋势 (Hofmann et al., 2009), 观测和模

^① Larmaque J F, Solomon S, Portmann R W, et al. 2011. Recent increase in stratospheric aerosol: Origin and influence on ozone depletion. Submitted to Geophysical Research Letters.

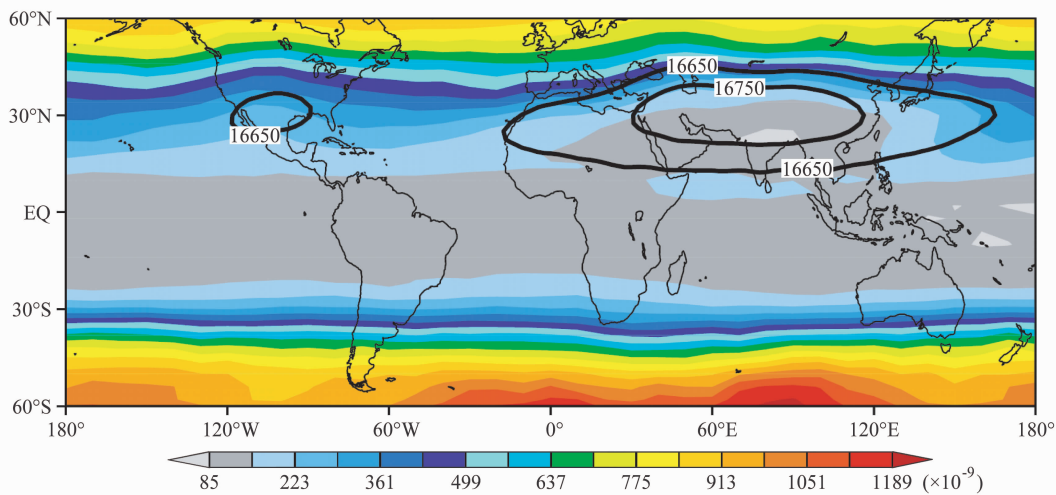


图 1 夏季 (6~8 月) 100 hPa 高度臭氧浓度 (彩色阴影) 分布 (资料来自 2005~2009 年 MLS 卫星观测)。等值线为 100 hPa 位势高度 (单位: gpm)

Fig. 1 Summertime (Jun - Jul - Aug) ozone concentration distribution at 100 hPa from Microwave Limb Sounder (MLS) measurements during 2005 - 2009 (color shading). Contour: potential height (gpm) at 100 hPa

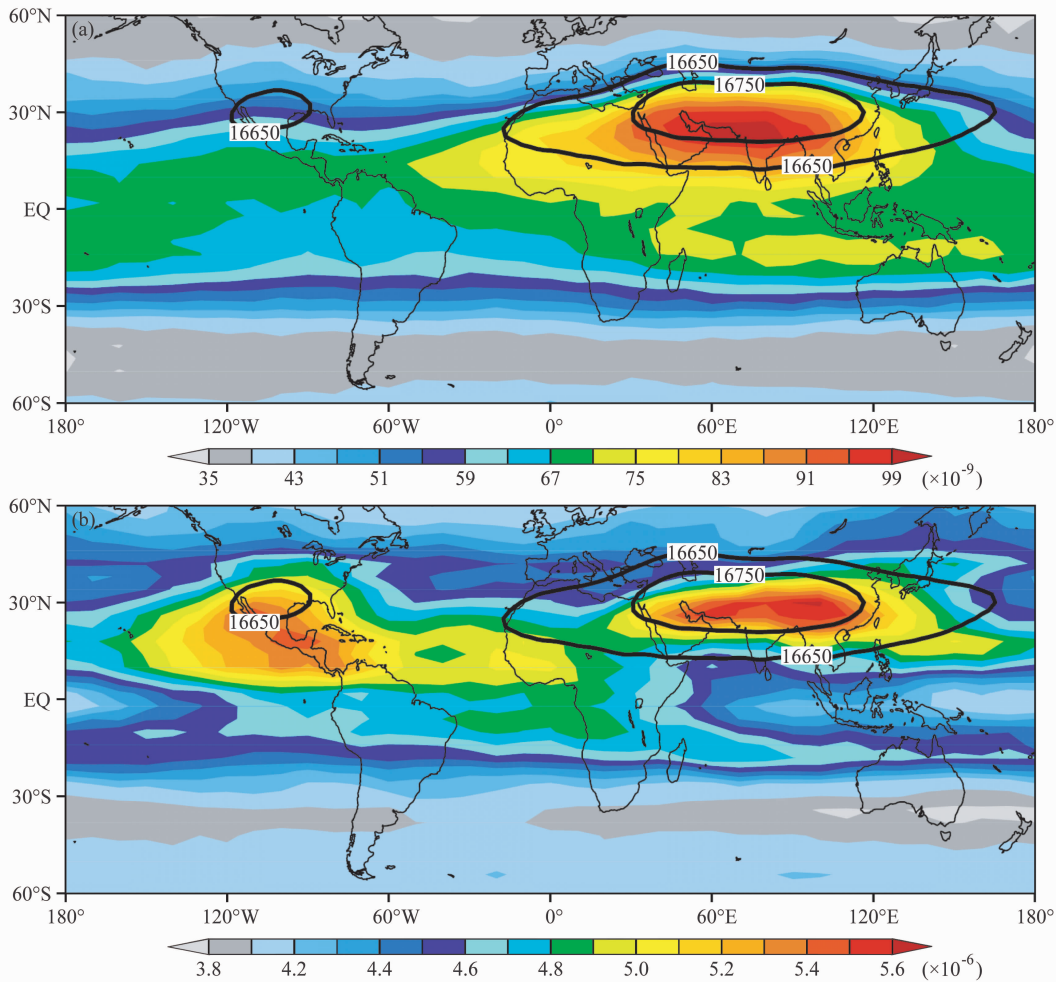


图 2 同图 1, 但为 (a) CO 和 (b) 水汽浓度分布

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for (a) CO concentration and (b) water vapor concentration

式模拟结果分析认为北半球平流层气溶胶的增加主要源于中国二氧化硫的人为排放 (Larmarque et al., 2011^①)。在 1990 至 2005 年间, 中国由于煤炭燃烧的导致二氧化硫人为排放增加了 70%, 在全球总量的比重从 1990 年的 15% 增加至 2005 年的 30% (在此期间全球二氧化硫人为排放降低 20%)。此外, 二氧化硫人为排放量进入平流层的比例依赖于地理位置, 尤其是与亚洲季风的关系, 使得中国排放权重更大。事实上, 尽管中国之外的地区当前 SO₂ 排放量也很显著 (尤其是美国), 但是全球三维化学/输送模式和排放表明: 能够到达上对流层以及下平流层的硫酸盐气溶胶绝大多数与夏季亚洲季风区有关。平流层气溶胶的增加能够解释过去十年北半球中纬度下平流层臭氧损耗的 20%, 因而抵消了臭氧层可能出现恢复 (蒙特利尔公约实施的效果) 的很大一部分。在未来数十年如果二氧化硫仍以目前速率排放, 将持续显著阻碍未来臭氧层的恢复。然而另有观点认为, 近十年来热带地区中等强度火山喷发的增多是全球平流层气溶胶增加的驱动因素 (Vernier et al., 2011)。

卫星资料分析还表明 (Su et al., 2011), 夏季亚洲污染物能够增加进入平流层的水汽输送。Su et al. (2011) 发现与清洁的卷云相比较, 在对流层顶附近污染区卷云冰晶粒子具有较小的有效半径、较高的温度和比湿。Su et al. (2011) 认为气溶胶冰核的增加造成卷云中冰晶粒子半径变小, 沉降速度变慢, 因而在空中停留时间更长, 辐射加热使得对流层顶附近温度变高, 因而这里有较大的蒸发和上升, 从而进入平流层的水汽通量增强。因此, 亚洲夏季风对底层污染物向 UTLS 区域的输送, 对于平流层水汽具有显著的影响, 进而影响臭氧化学和全球辐射收支。

6 结语

早先的研究认为, 夏季青藏高原是对流层低空物质向平流层输送的一个重要渠道 (周秀骥等, 2004)。但越来越多的卫星观测显示, 夏季南亚高压控制区是平流层示踪物臭氧的低值区, 也是对流层示踪物如 CO、水汽、CH₄ 等的大值区。卫星观测和数值模拟研究表明, 亚洲夏季风区是对流层污

染物进入全球平流层的一个重要通道, 而青藏高原只是其中的一个区域。由于亚洲季风区是目前世界上经济发展最快的地区, 也是世界人口最集中的地区, 是全球最重要的污染源地区, 因此在对流层污染物进入全球平流层大气过程中, 亚洲夏季风可能是一个极为重要的途径。亚洲夏季风对污染物向全球平流层的输送, 将对全球平流层大气成分的收支产生重要的影响, 也会通过臭氧化学和辐射过程影响全球平流层气候环境。

目前, 关于亚洲夏季风对低层污染物向全球平流层输送机制尚存在很大的争议, 主要涉及到两个完全不同尺度的输送过程: 一个是快速的对流输送过程, 另一个则是缓慢的大气尺度上升输送运动。过去的研究主要依赖于卫星观测和数值模拟, 而缺乏亚洲季风区的野外观测数据。为了进一步认识亚洲夏季风的大气成分分布和变化的细节, 从而分析输送机理, 需要更多开展亚洲季风区 UTLS 区域大气成分的现场观测, 包括气球探空和飞机观测。

参考文献 (References)

- 卞建春, 李维亮, 周秀骥. 1997. 青藏高原及其邻近地区流场结构季节性变化的特征分析 [M]//周秀骥. 中国地区大气臭氧变化及其对气候环境的影响 (二). 北京: 气象出版社, 274–285. Bian Jianchun, Li Weiliang, Zhou Xiuji. 1997. Analysis of the seasonal variation feature of the wind structure over Tibetan Plateau and its surroundings [M] // Zhou Xiuji. Atmospheric Ozone and Its Impact on Climate and Environment in China (II) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 274–285.
- 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]. Advances in Atmospheric Sciences, doi: 10.1007/s00376-011-0174-9.
- 陈斌, 徐祥德, 卞建春, 等. 2010. 夏季亚洲季风区对流层向平流层输送的源区、路径及其时间尺度的模拟研究 [J]. 大气科学, 34: 495–505. Chen Bin, Xu Xiangde, Bian Jianchun, et al. 2010. Sources, pathways and timescales for the troposphere to stratosphere transport over Asian monsoon regions in boreal summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34: 495–505.
- 丛春华, 李维亮, 周秀骥. 2001. 夏季青藏高原及其邻近地区上空平流层—对流层之间大气的质量交换 [J]. 科学通报, 46: 1914–1918. Cong Chunhua, Li Weiliang, Zhou Xiuji. 2001. Mass ex-

① Larmarque J F, Solomon S, Portmann R W, et al. 2011. Recent increase in stratospheric aerosol: Origin and influence on ozone depletion. Submitted to Geophysical Research Letters.

- change between stratosphere and troposphere over the Tibetan Plateau and its surroundings [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 46: 1914–1918.
- 樊文璇, 王卫国, 卞建春, 等. 2008. 青藏高原及其邻近区域穿越对流层顶质量通量的时空演变特征 [J]. 大气科学, 32: 1309–1318. Fan Wenxuan, Wang Weiguo, Bian Jianchun, et al. 2008. The distribution of cross-tropopause mass flux over the Tibetan Plateau and its surrounding regions [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32: 1309–1318.
- Fu R, Hu Y, Wright J S, et al. 2006. Short circuit of water vapor and polluted air to the global stratosphere by convective transport over the Tibetan Plateau [J]. Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A., 103: 5664–5669, doi: 10.1073/pnas.0601584103.
- Gettelman A, Kinnison D E, Dunkerton T J, et al. 2004. Impact of monsoon circulations on the upper troposphere and lower stratosphere [J]. J. Geophys. Res., 109, D22101, doi: 10.1029/2004JD004878.
- Hofmann D, Barnes J, O'Neill M, et al. 2009. Increase in background stratospheric aerosol observed with lidar at Mauna Loa Observatory and Boulder, Colorado [J]. Geophys. Res. Lett., 36, L15808, doi: 10.1029/2009GL039008.
- Jackson D R, Driscoll S J, Highwood E J, et al. 1998. Troposphere to stratosphere transport at low latitudes as studies using HALOE observations of water vapour 1992–1997 [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 124: 169–192.
- Konopka P, Groöß J U, Günther G, et al. 2010. Annual cycle of ozone at and above the tropical tropopause: Observations versus simulations with the Chemical Lagrangian Model of the Stratosphere (CLaMS) [J]. Atmos. Chem. Phys., 10, 121–132, doi: 10.5194/acp-10-121-2010.
- Li Q, Jiang J H, Wu D L, et al. 2005. Convective outflow of South Asian pollution: A global CTM simulation compared with EOS MLS observations [J]. Geophys. Res. Lett., 32, L14826, doi: 10.1029/2005GL022762.
- 林伟立, 姚波. 2005. 利用 SAGE II 卫星资料分析青藏高原上空臭氧垂直廓线 [J]. 环境科学研究, 18: 102–105. Lin Weili, Yao Bo. 2005. Analysis on the vertical ozone profiles over Tibetan Plateau using SAGE II data [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 18: 102–105.
- Park M, Randel W J, Kinnison D E, et al. 2004. Seasonal variation of methane, water vapor, and nitrogen oxides near the tropopause: Satellite observations and model simulations [J]. J. Geophys. Res., 109, D03302, doi: 10.1029/2003JD003706.
- Park M, Randel W J, Gettelman A, et al. 2007. Transport above the Asian summer monsoon anticyclone inferred from Aura Microwave Limb Sounder tracers [J]. J. Geophys. Res., 112, D16309, doi: 10.1029/2006JD008294.
- Park M, Randel W J, Emmons L K, et al. 2008. Chemical isolation in the Asian monsoon anticyclone observed in Atmospheric Chemistry Experiment (ACE-FTS) data [J]. Atmos. Chem. Phys., 8: 757–764.
- Park M, Randel W J, Emmons L K, et al. 2009. Transport pathways of carbon monoxide in the Asian summer monsoon diagnosed from Model of Ozone and Related Tracers (MOZART) [J]. J. Geophys. Res., 114, D08303, doi: 10.1029/2008JD010621.
- Randel W J, Park M. 2006. Deep convective influence on the Asian summer monsoon anticyclone and associated tracer variability observed with Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) [J]. J. Geophys. Res., 111, D12314, doi: 10.1029/2005JD006490.
- Randel W J, Park M, Emmons L, et al. 2010. Asian monsoon transport of pollution to the stratosphere [J]. Science, 328: 611–613.
- 石广玉, 白宇波, 岩坂泰信, 等. 2000. 拉萨上空大气臭氧垂直分布的高空气球探测 [J]. 地球科学进展, 15: 522–524. Shi Guangyu, Bai Yubo, Yasunobu Iwasaka, et al. 2000. A balloon measurement of the ozone vertical distribution over Lhasa [J]. Advances in Earth Sciences (in Chinese), 15: 522–524.
- Su H, Jiang J, Liu X, et al. 2011. Observed increase of TTL temperature and water vapor in polluted clouds over Asia [J]. J. Climate, 24, 2728–2736, doi: 10.1175/2010JCLI3749.1.
- Vernier J P, Thomason L W, Pommereau J P, et al. 2011. Major influence of tropical volcanic eruptions on the stratospheric aerosol layer during the last decade [J]. Geophys. Res. Lett., 38, L12807, doi: 10.1029/2011GL047563.
- 郑向东, 汤洁, 李维亮, 等. 2000. 拉萨地区 1998 年夏季臭氧总量及垂直廓线的观测研究 [J]. 应用气象学报, 11: 173–179. Zheng Xiangdong, Tang Jie, Li Weiliang, et al. 2000. Observational study on total ozone amount and its vertical profile over Lhasa in the summer of 1998 [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 11: 173–139.
- Zou H, Gao Y Q. 1997. Vertical ozone profile over Tibet using SAGE I and II data [J]. Adv. Atmos. Sci., 14: 505–512.
- 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: 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: 899–908.
- 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: 1396–1398. Zhou Xiujie, Luo Chao, Li Weiliang, et al. 1995. The column ozone variation in China and the low value ozone center over Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 40: 1396–1398.
- 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: 513–527. Zhou Xiujie, Li Weiliang, Chen Longxun, et al. 2004. Study of ozone change over Tibetan Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62: 513–527.