

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 (3): 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 (3): 495–505.

# 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

陈斌<sup>1, 2</sup> 徐祥德<sup>1</sup> 卞建春<sup>3</sup> 施晓晖<sup>1</sup>

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 香港中文大学太空与地球信息科学研究所, 香港 999077

3 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

**摘 要** 基于 NCEP/NCAR 分析资料和拉格朗日轨迹输送模式 FLEXPART, 通过气块轨迹计算, 对 2005 年夏季亚洲季风区对流层向平流层输送 (Troposphere to Stratosphere Transport, 简称 TST) 的近地层源区、输送路径及其时间尺度问题进行了一些初步探讨。结果表明: (1) 夏季亚洲季风区 TST 两个主要的边界层源区, 一个是热带西太平洋地区; 另一个是青藏高原南部、孟加拉湾以及印度半岛中北部等地区, 上述两个区域与夏季强对流的分布相一致。在对流层顶高度附近 (约 16 km 高度), 两个近地层源区的垂直输送贡献相当。但进一步分析发现, 穿越对流层顶高度的质量输送只有约 10% 能够进入 20~22 km 高度的平流层中, 且主要源于以青藏高原南侧为代表的南亚季风区 (约贡献 75%), 这进一步强调了青藏高原及其周边区域在全球 TST 过程中的重要地位。(2) 轨迹分析显示, 夏季亚洲季风区对流层进入平流层的“入口区”主要在 (25°N~35°N, 90°E~110°E) 区域的青藏高原及其周边区域。TST 路径受对流层上层南亚高压闭合环流、北半球副热带西风急流和赤道东风急流的共同控制。(3) 亚洲季风区 TST 两个主要的过程, 一个是和夏季湿对流抬升直接联系的快速输送过程, 它可以使近地层大气在 1~2 天内输送到平流层中, 贡献了整个 TST 的 10%~30%; 另一个是大气辐射加热所致的大尺度垂直输送, 该输送是一个相对的慢过程, 时间尺度一般为 5~30 天。此结果意味着, 源于地表的短生命周期的大气污染物可通过光化学反应过程对该区域平流层臭氧及其他大气痕量成分平衡产生重要影响。

**关键词** 对流层向平流层输送 亚洲季风区 边界层源区 输送路径 时间尺度

**文章编号** 1006-9895 (2010) 03-0495-11

**中图分类号** P421

**文献标识码** A

## Sources, Pathways and Timescales for the Troposphere to Stratosphere Transport over Asian Monsoon Regions in Boreal Summer

CHEN Bin<sup>1, 2</sup>, XU Xiangde<sup>1</sup>, BIAN Jianchun<sup>3</sup>, and SHI Xiaohui<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Institute of Space and Earth Information Science, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077

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

**收稿日期** 2009-04-18, 2009-08-25 收修定稿

**资助项目** 科技部国际合作项目 (编号: 2007DFB20210, 2009DFB20540), 中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金重点项目 (批准号: 2008Z006), 灾害天气国家重点实验室自主研究项目 (编号: 2008LASWZI04、2009LASWZF02) 联合资助。

**作者简介** 陈斌, 男, 1977 年出生, 博士, 主要从事大气环境变化与气候效应研究。E-mail: cbsdly792@126.com

**Abstract** Based on a Lagrangian dispersion model FLEXPART driven by the NCEP/NCAR global forecast system reanalysis data, the authors study the pathways and timescale of troposphere to stratosphere transport (TST) over the Asian monsoon regions during the summer of 2005 using the air parcels back trajectories, as well as the surface sources, defined in terms of the locations where each trajectory last left the atmospheric planetary boundary layer. The following conclusions are drawn in the paper: (1) The boundary layer sources are most located (approximately four fifths) vertically above two areas, one is the south of the Tibetan Plateau, the Indian Ocean, and the Bay of Bengal, and the other is the tropical western Pacific regions. These two areas correspond to those regions previously identified as sources for active deep convection. Even though the two regions make the same contribution to transportation from the PBL to the base of tropopause layer (about 16 km), the transport from the tropopause layer to the stratosphere with a much smaller fraction (about 10%) arriving at the 20–22 km height is dominated by the former (approximately 75%). These analysis results emphasize the importance of Asian monsoon regions in the TST, with the Tibetan Plateau, the Indian Ocean, and the Bay of Bengal being the dominant source of the stratospheric “overworld” air. (2) The analysis of trajectories reveals that the air parcels arrive at and cross the tropopause mainly over the south of Tibetan Plateau and its adjacent areas (25°N–35°N, 90°E–110°E). These pathways represent a regional pattern and are largely co-controlled by the South Asia high circulation in the upper troposphere, the northern hemispheric subtropical jet and the equatorial easterly jet. Then about at 150 hPa, the most air parcels are transported westward, the rest entered the South Asian monsoon regions. (3) The results also reveal that there are two main processes in the TST. One is a fast transport process related to the convection uplift which can bring the boundary layer mass into the stratosphere in 1–2 days and make a contribution about 10%–30% of the overall mass transport. The other is a slow transport process relatively which may be related to the large-scale vertical transport due to atmospheric radiative heating in the upper troposphere. Overall, a part of transport from the boundary layer to the lower stratosphere is so rapid that this can represent an important route by which very short-lived substances, emitted at the surface, can influence the lower stratospheric ozone and other tracer budget.

**Key words** troposphere-to-stratosphere transport, Asian monsoon, boundary layer sources, transport pathway, timescale

## 1 引言

夏季亚洲季风区大气环流与下部持续深对流相耦合 (Hoskins and Rodwell, 1995; Highwood and Hoskins, 1997) 以及大尺度海陆分布和青藏高原大地形造成的动力、热力效应 (徐祥德等, 2001; 吴国雄等, 2002), 使得上对流层的南亚高压反气旋可以向上扩展到下平流层 (苏东玉等, 2006)。在此特殊的环流形势影响下, 夏季亚洲季风区上对流层一下平流层 (8~20 km) 大气成分分布及其变化具有其独特的区域特征。周秀骥等 (1995) 研究发现, 夏季青藏高原上空存在整层臭氧含量的低值中心, 以后的研究进一步证实了这一现象 (卞建春等, 1997; Gettelman et al., 2004)。最近的观测资料研究亦表明, 南亚高压反气旋控制上对流层一下平流层区域不但是臭氧含量的极值中心, 而且亦是其他大气成分分布的异常中心 (Lelieveld et al., 2002; Dessler and Sherwood, 2004; Li et al.,

2005; 陈月娟和施春华, 2005; Fu et al., 2006; Park et al., 2007; 毕云等, 2008)。上对流层一下平流层痕量成分的分布和变化对地气系统的辐射能量平衡有重要的影响 (邓淑梅等, 2009; 陆春晖等, 2009), 进而影响到全球的气候变化。而夏季亚洲季风区对流层向平流层输送 (Troposphere to Stratosphere Transport, TST) 是影响该区域大气痕量成分组成的重要过程。因此, 对亚洲区域 TST 过程的研究是评估其对全球大气成分变化可能影响的基础, 对未来的亚洲区甚至全球气候变化也具有重要意义。

已有研究指出, 亚洲夏季季风区是对流层向平流层质量输送的关键区 (丛春华等, 2001; 杨健和吕达仁, 2004; 樊雯璇等, 2008)。Dethof et al. (1999) 指出亚洲季风区是夏季平流层水汽的主要源区, 输送到全球热带平流层水汽总量的 75% 左右为亚洲季风区所提供 (Gettelman et al., 2002)。总体而言, 亚洲季风区作为夏季北半球 TST 的“窗

口”,虽然引起了研究者的强烈兴趣,但至今为止其研究仍然薄弱(陈洪滨等,2006;吕达仁等,2008)。最近,国外以三维轨迹模式为工具的数值模拟研究被广泛应用于 TST 过程的研究(Hatsushika and Yamazaki, 2003; Bonazzola and Haynes, 2004; Fueglistaler et al., 2004, 2005; Berthet et al., 2007),但是以上研究所采用的轨迹模式中,大多没有考虑湍流和中小尺度的对流过程。

近年来,利用大气化学输送模式和轨迹方法对有关 TST 的近地层源区以及输送路径问题的研究已有很多。如 Li et al. (2005) 用三维化学输送模式模拟研究指出,强对流和喜马拉雅山南坡地形抬升作用的共同影响下,使得源于印度和中国南部的边界层污染大气可以向上输送到上对流层。最近, Berthet et al. (2007) 通过轨迹方法研究了全球尺度上对流层向平流层质量输送的源,指出夏季的青藏高原及热带西太平洋可能是对流层向平流层质量输送的重要区域。Levine et al. (2007) 以大气输送模式和轨迹方法,研究了 2001 年 1 月热带地区边界层、热带对流层顶和平流层之间的输送过程。以上研究大都着眼于全球尺度的热带地区,虽然结果都强调了亚洲季风区的重要作用,但是针对该区域的专门研究还不多见。

需要指出的是,关于 TST 输送时间尺度的研究亦是一个重要的科学问题。对于水汽输送过程,时间尺度可能不重要,但是对短生命周期的近地层大气污染物(如卤代物)则不同,如果大气边界层污染物能够在较短的时间内被输送到平流层,尤其是大气污染物如果能进入位温大于 380 K 的“Overworld”,则可以通过光化学反应过程对平流层臭氧含量等痕量成分产生重要影响(Bridgeman et al., 2000)。这对于正确评估源于地面的大气污染物,尤其是近地层自然和人类排放的短生命周期的微量卤代物在平流层中的光化学反应过程对臭氧损耗的作用亦具有一定参考价值。近年来,平流层臭氧损耗的原因也是科学家们所关注的一个重要问题(Pfeilsticker et al., 2000; 周秀骥等, 2004; Salawitch et al., 2005)。

因此,本文在前人研究基础上,借助于高分辨的拉格朗日轨迹输送模式,试图对以下尚未明确的问题进行探讨:夏季亚洲季风区 TST 的近地层源区在哪里? 大气污染物从边界层输送到平流层的输

送通道和路径如何? 边界层中大气污染物到达平流层所需要的时间尺度是多少?

## 2 模式和模拟方案简介

### 2.1 FLEXPART 轨迹输送模式

拉格朗日轨迹输送模式 FLEXPART 通过计算粒子(小空气块)的运动轨迹,实现对大气物质的输送和扩散过程的模拟(Stohl et al., 2005)。作为新一代的拉格朗日模式工具,它可以用来模拟点源、线源、面源和三维大气源排放的大气示踪物质的长期和中尺度输送、扩散、干湿沉降及其辐射衰减过程,其时间上的前向轨迹模拟可以用来模拟排放源的轨迹一扩散过程,而后向模拟可以确定排放源的影响区域。和欧拉模式相比,拉格朗日模式的优点是积分过程中空间分辨率不受数值离散的影响,保持了较高的精度。同时,该模式和其他的轨迹模式相比,考虑了湍流和中小尺度的对流过程(Forster et al., 2007)。

FLEXPART 目前已被应用于很多方面的研究,包括大气污染输送、中尺度输送过程研究、大气水循环、对流层—平流层交换以及气候学尺度上的全球污染物的输送研究(Stohl and Thomson, 1999; Forster et al., 2001; Stohl et al., 2003; James et al., 2003)。FLEXPART 所需要的气象场资料(风、气压、温度等)可以由 ECMWF 的再分析气象数据或者 NCEP/NCAR 再分析资料等提供。模拟结果可以输出每个“气块”的三维位置及其他物理信息,如位涡、比湿、温度、对流层顶高度等。

### 2.2 FLEXPART 模式中的区域填塞(domain filling)技术

FLEXPART 模式的区域填塞技术(domain filling)是指在模式积分之初,将模式区域尺度甚至全球尺度的三维空间划分为足够多的气块( $10^4 \sim 10^6$ )。气块初始状态分布按照空气密度大小而相对均匀分布,每个“气块”具有相同的质量,所有“气块”质量总和等于整个三维空间大气质量。模式积分开始之后,“气块”将依据风、压、温度等驱动下运动,进而实现对区域大气输送过程的描述。对于有限区域而言,模式积分开始之后,将累积流入边界上的质量通量,一旦边界流入质量超过了一个空气“气块”所具有的质量,那么在此边界之上将有

一个新的“气块”产生。同理,在有限区域的流出边界之上,将有“气块”消失。

### 2.3 模拟方案

本文模式输入气象场采用 2005 年 5~9 月,空间分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$ 、每 6 小时一次的 NCEP 的 GFS 模式的输出资料。资料垂直方向从 1000~10 hPa 分为 26 层。模拟经纬度范围为 ( $0^\circ \sim 70^\circ \text{N}$ ,  $0^\circ \sim 180^\circ \text{E}$ ),高度范围为 0.2~22 km,初始化空气块数目为 150 万个,这样每个空气气块所具有的质量大约为  $1.22 \times 10^{12}$  kg。采用后向模拟方法,模拟开始于 2005 年 5 月 15 日,结束为 2005 年 9 月 15 日,气块的三维空间位置及该位置上的对流层顶高度、边界层高度等信息每 12 小时输出一次。这里,我们只是考虑夏季情况,因此只对 2005 年 6 月 1 日到 8 月 31 日模式输出结果进行了分析。

### 2.4 对流层顶的定义

对流层顶有动力学和热力学两种定义,在热带地区由于科氏力接近于零,动力学定义不再适用。本文主要研究高原及其周边区域,包括了热带和热带外地区,因此为了保证对流层顶在空间上的连续性,采纳 James et al. (2003) 等权重函数定义的混合对流层顶,即在中高纬地区采用动力对流层顶定义,在热带地区采用热力对流层顶定义,而在副热带地区采用线性插值方法得到,即混合对流层顶  $p = Wp_{\text{dyna}} + (1 - W)p_{\text{therm}}$ ,其中,  $p_{\text{dyna}}$  表示动力对流层顶,  $p_{\text{therm}}$  表示热力对流层顶,当  $\phi \geq 30^\circ \text{N}$  时,  $W = 1$ ; 当  $\phi \leq 20^\circ \text{N}$  时,  $W = 0$ ; 在  $25^\circ \text{N} \sim 30^\circ \text{N}$  区域通过线性插值求得  $W$ 。这里将动力对流层顶  $p_{\text{dyna}}$

取为 2 PVU ( $1 \text{ PVU} = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 所在的气压高度,热力学对流层顶采用世界气象组织的定义 (Hoinka, 1997),即距离地面 500 hPa 高度以上,且温度递减率小于等于  $2^\circ \text{C}/\text{km}$  的气压高度。

## 3 夏季亚洲季风区对流层向平流层输送源区

首先,我们挑选出在模拟时段内从大气行星边界层输送到对流层顶高度气块,然后,将气块在边界层高度附近的空間位置定义为对流层向平流层输送的源区。

图 1 给出了 2005 年夏季 TST 过程中,源于边界层而到达对流层顶高度以上的后向轨迹气块在  $1^\circ \times 1^\circ$  经纬度网格上的分布。可以看到,能够到达 ( $0^\circ \sim 40^\circ \text{N}$ ,  $20^\circ \text{E} \sim 120^\circ \text{E}$ ) 亚洲季风区对流层顶高度上的大气主要有两个边界层源区(合占总数的 91%),一个是热带西太平洋区域,另外一个青藏高原及其南部的区域,包括青藏高原南部、孟加拉湾及其印度半岛中北部等。相应地,在这两个大区域中存在明显的极大值区域,一个是以 ( $15^\circ \text{N}$ ,  $135^\circ \text{E}$ ) 为中心,南北 5 个经纬度左右的热带西太平洋异常区域,另外一个青藏高原及其以南的印度次大陆和孟加拉湾。为叙述方便,以下将 ( $10^\circ \text{N} \sim 30^\circ \text{N}$ ,  $120^\circ \text{E} \sim 150^\circ \text{E}$ ) 范围的热带西太平洋地区简称为 WPO (Western Pacific Ocean),将 ( $10^\circ \text{N} \sim 35^\circ \text{N}$ ,  $70^\circ \text{E} \sim 100^\circ \text{E}$ ) 范围的青藏高原及印度次大陆和孟加拉湾等地区通称为青藏高原南部地区,简

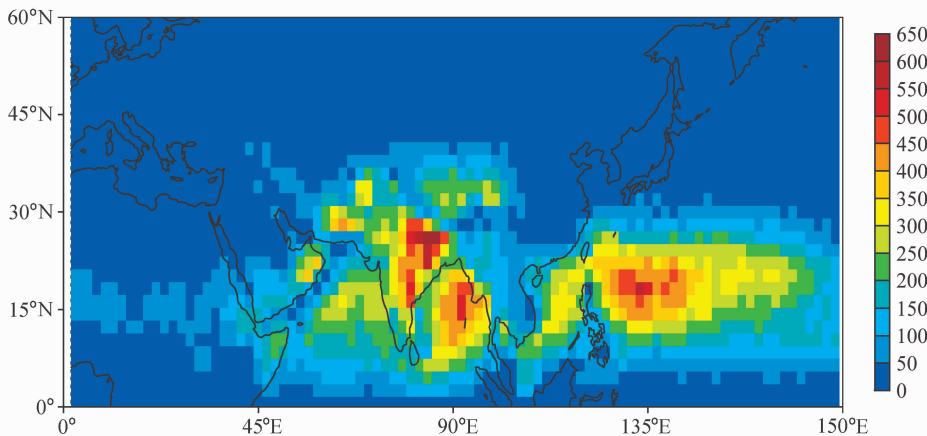


图 1 2005 年夏季从大气边界层出发且到达对流层顶高度的气块后向轨迹在大气行星边界层内的分布

Fig. 1 The air parcels distribution calculated for those trajectories leaving the boundary layer that subsequently arrive in the stratosphere within the period of Jun to Aug 2005

写为 STP (South of the Tibetan Plateau)。

图 2 分别给出了 AIRS 卫星资料反演的 2005 年 6 月、7 月、8 月和夏季 6~8 月平均的云顶高度分布。云顶高度可以近似表征对流的强弱分布。比较图 1 表征的 TST 的源区和图 2 表征的夏季对流分布, 可以看出夏季亚洲季风区 TST 过程的源区和强对流区域相一致。这也强调了对流抬升输送作用在对流层向平流层输送过程的重要作用。

考虑到夏季亚洲季风区对流层高度平均而言为 12~16 km, 本文还分别计算了源于边界层而穿越 18、20、22 km 高度的气块统计分布特征。小空气块可以穿越对流层顶, 是否能够到达位温大于 380 K 的平流层“Overworld”区域也具有较为重要的意义。因为这些气块可以深层次地参与全球对流层—平流层物质交换的循环过程, 这对全球大气成分组成影响更为重要。

图 3 给出了 2005 年夏季 TST 过程中, 通过后向轨迹计算的源于边界层而到达 18 km、20 km 和 22 km 高度的气块数目在边界层高度内的分布。比较图 1 和图 3 可以看出, 随着高度的增加, 只有约 1/10~1/20 的气块能够到达 20~22 km 高度上平流层“Overworld”区域。同时, 也可以看到, 虽然 STP 和 WPO 两个主要的源区贡献的相对重要性也

发生改变。在 18 km 高度上 (一般高于对流层顶), STP 向平流层的输送已经超过了 WPO, 随着高度进一步增加, 如在 20 km 和 22 km 高度上, 能到达相应高度的空气气块已经很少来源于 WPO。

进一步计算源于边界层的气块到达不同高度情况下, STP 和 WPO 两个不同影响源区的后向轨迹气块数目所占的相对百分比份额 (图 4)。可以发现, WPO 和 STP 源区在深 TST 过程中所起的作用存在较大变化。在对流层顶高度 (约 16 km), WPO 和 STP 在深 TST 质量输送过程中的作用相当。而在 22 km 高度以上, 源于 STP 的空气气块约占总空气气块数目的 80%。这说明在 TST 过程中, 从 STP 区域大气行星边界层抬升的小空气块可以向上输送到平流层中更高高度。此结果进一步强调了 STP 在 TST 质量输送过程中的重要作用, 这结果和 Fu et al. (2006) 分析结果相一致, 即高原及其周边区域的 TST 能输送到更高的高度。为什么高原及其周边区域进入平流层中的大气能够抬升到更高高度? 对于这种现象的可能解释就是与青藏高原南部区域距离夏季亚洲季风区 STE 的“入口区” (图 5) 较近有关, 使得受对流抬升的空气块能够在较短的时间内穿越对流层顶后, 还具有较大的能量, 进而抬升到更高的高度。但是详细原因解释还有待于更深入分析研究。

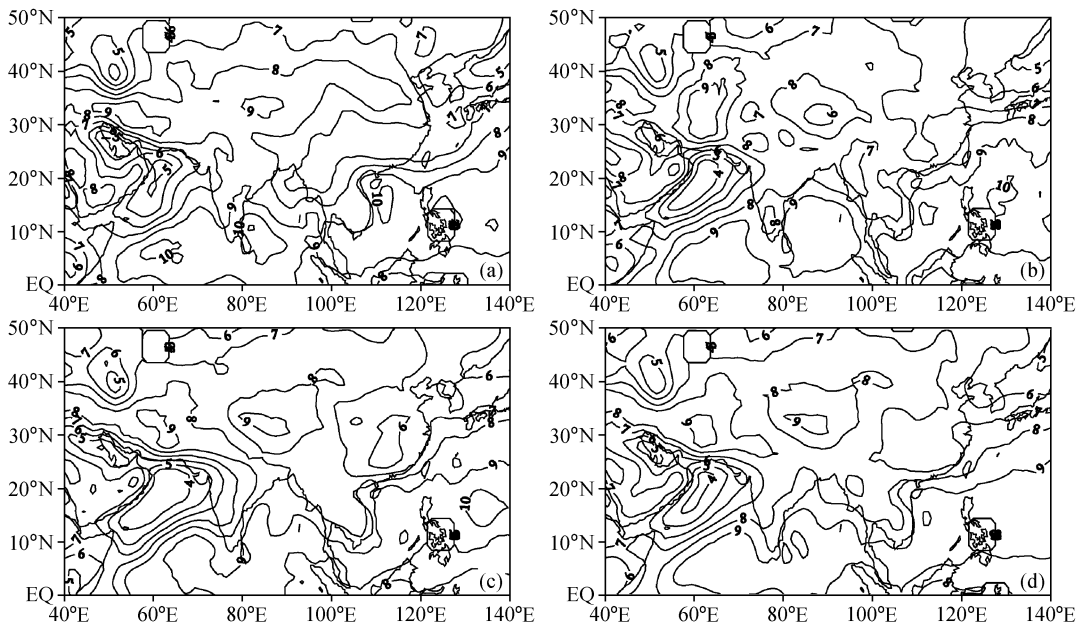


图 2 AIRS 卫星资料反演的 2005 年的云顶高度分布 (单位: km): (a) 6 月; (b) 7 月; (c) 8 月; (d) 夏季 6~8 月平均  
Fig. 2 The mean cloud top height (km) retrieved from the AIRS satellite for (a) Jun, (b) Jul, (c) Aug, and (d) the summer mean of 2005

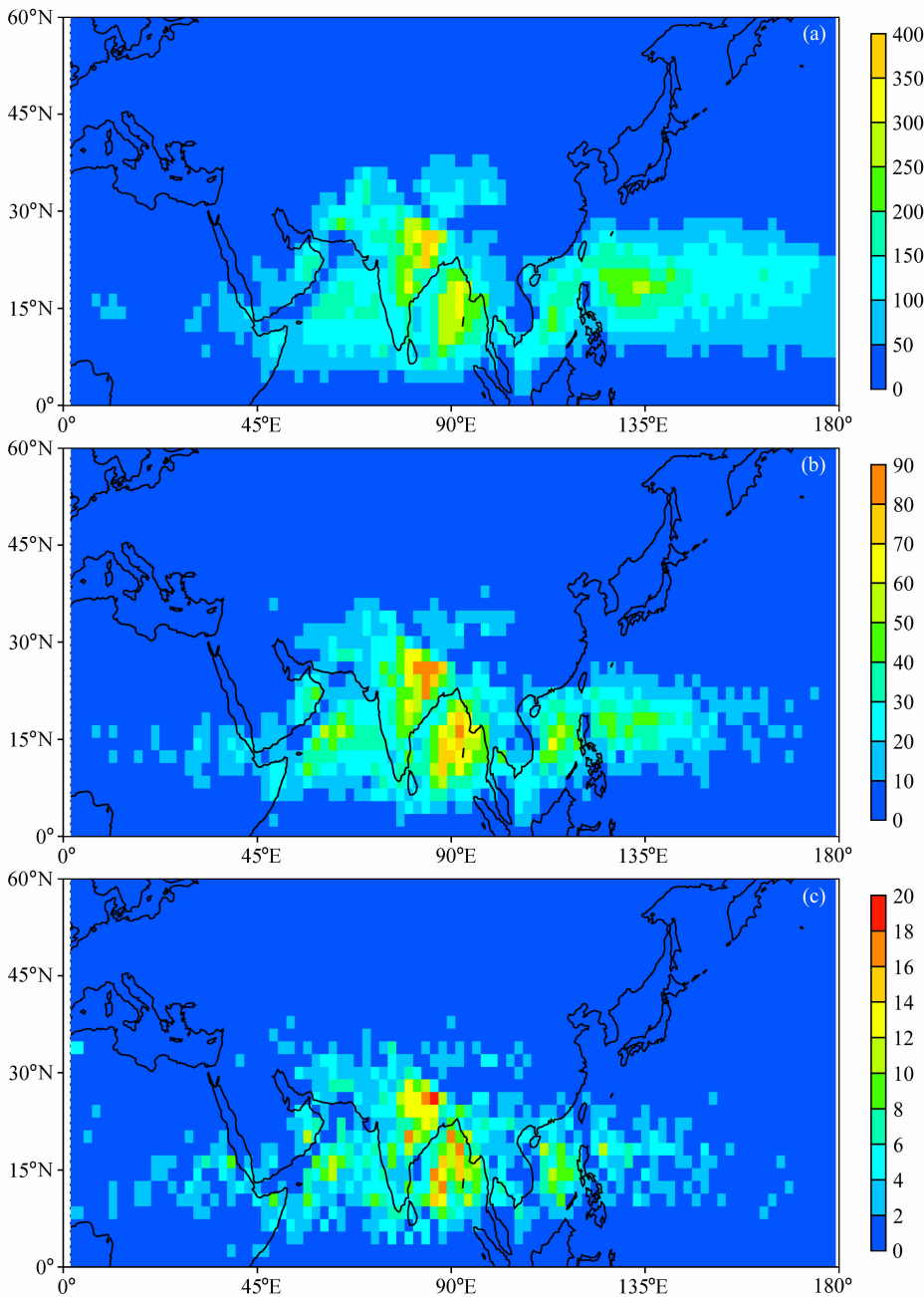


图 3 同图 1, 但为到达 (a) 18 km、(b) 20 km 和 (c) 22 km 高度气块后向轨迹计算结果

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for the trajectories leaving the boundary layer that subsequently arrive at the heights of (a) 18 km, (b) 20 km, and (c) 22 km

#### 4 夏季亚洲季风区 TST 的输送路径

为了探讨夏季亚洲季风区 TST 的输送路径问题, 我们首先根据气块轨迹确定了 TST 在对流层顶的主要“入口区”, 也即对流层—平流层质量输送发生的位置。图 5 给出了依据向上穿越对流层顶且在平流层中滞留时间超过 96 小时的所有气块计

算的夏季平均质量输送通量分布。可以看到, 夏季亚洲季风区整个区域都存在对流层向平流层输送。垂直方向上对流层—平流层输送主要发生在 40°N 以南、85°E~130°E 之间的区域, 且在青藏高原上空及其临近区域又是 TST 质量通量极大值区, 表明源于近地层的大气输送主要在该“入口区”进入平流层中。

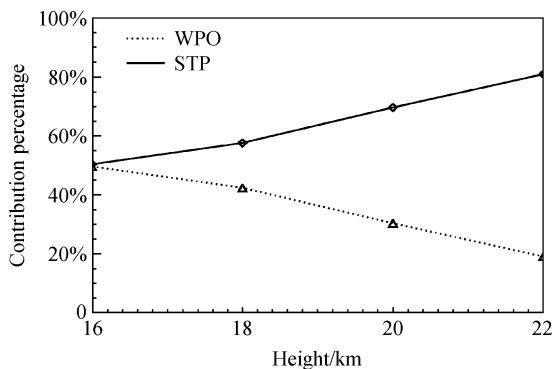


图 4 源于 WPO 和 STP 两个边界层源区的质量输送在不同高度下的相对贡献百分比

Fig. 4 The relative contributions of the mass transport from the WPO and STP areas at different heights

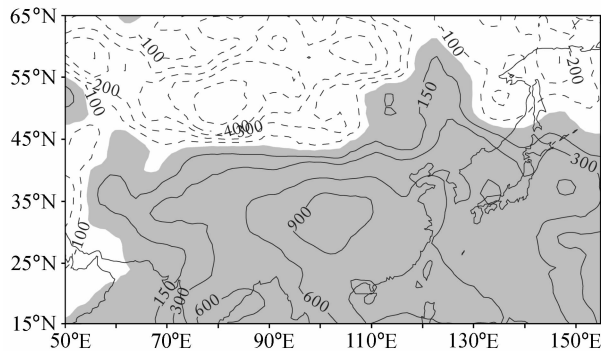


图 5 2005 年夏季对流层-平流层质量输送分布 (单位:  $\text{kg} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )。正值 (阴影) 表示对流层向平流层的质量输送, 负值表示平流层向对流层的质量输送

Fig. 5 Geographical distribution of the stratosphere-troposphere exchange (STE) mass flux ( $\text{kg} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) for the summer of 2005 based upon exchange trajectories with a threshold residence time of 96 h. The positive values (shaded area) indicate the troposphere to stratosphere mass transport, and vice versa

前文分析结果表明, 夏季亚洲季风区到达对流层高度的两个近地层源区 STP 和 WPO。为了分析方便, 下面利用三维轨迹模拟的结果, 分别对这两个区域的 TST 的输送路径和时间尺度分析。图 6 给出了 2005 年夏季能够到达对流层顶或者以上高度, 而源于 WPO 边界层内的空气气块输送轨迹, 其中颜色分别表示气块的从边界层释放的时间 (a) 和气块高度 (b)。由于模式模拟过程中气块数目较多, 为方便直观显示, 每间隔 100 个画一条轨迹。可以看到, 源于热带西太平洋地区边界层高度内的小空气块在 TST 过程中, 一般在 3~8 天以内就可以达到 14~16 km 高度, 然后在赤道东风急流的作用

用下向上向西输送, 一般在两周左右到达亚洲季风反气旋的西部, 在反气旋作用下向高纬地区输送, 继而一部分气块在南亚高压闭合环流和高空西风急流作用下向东向下输送。

同样, 对于高原及其南部的孟加拉湾区域, 图 7 给出同时段内的气块输送轨迹。亦可以看出, 赤道东风急流在 TST 过程中亦扮演着重要作用, 气块受到高原南侧的对流和地形加热抬升后, 一部分气块在赤道东风急流作用下向西输送, 然后在南亚反气旋的控制下转向, 继而在副热带西风急流作用下向东输送。

## 5 夏季亚洲季风区 TST 的时间尺度

为进一步分析 TST 输送的时间尺度问题, 我们以 2005 年 6~8 月 STP 和 WPO 两个区域所有源于大气行星边界层高度且到达对流层顶高度的所有气块为考察对象。图 8 给出了不同时间尺度下, 从边界层高度抬升且进入平流层的输送占整个 2005 年夏季输送总量的百分比变化 (a) 及其累积百分比变化 (b)。可以看出, 夏季亚洲季风区 TST 输送在很短的时间内就可以有很大部分进入到平流层中, 时间尺度小于 2 天的输送过程在 STP 和 WPO 区域分别贡献了整个夏季 TST 输送的近 30% 和 10%。而时间尺度大于 2 天的输送过程分布范围较广, STP 和 WPO 区域 3~10 天的 TST 相对重要, 分别贡献约 45% 和 30%, 时间尺度为 10~30 天的输送过程的贡献随时间变化相对均匀, STP 和 WPO 区域分别贡献约 20% 和 50%。

目前, 关于近地层大气 TST 输送过程的机制主要持有两种不同的观点, 一种观点认为是深对流抬升, 这是一种快速的过程, 即通过对流的直接输送 (Gettelman et al., 2002), 使得近地层大气可以直接输送到平流层中。目前, 已经有一些观测资料和数值模拟都证实对流作用的确可以使得源于下对流层的大气直接输送到平流层下层中。另外一种观点认为进入平流层的输送过程主要和辐射加热产生的大尺度垂直输送有关, 这是一种慢的抬升过程, 即在大尺度上升运动输送作用下进入平流层 (Holton and Gettelman, 2001; Fueglistaler et al., 2005)。最近, Narayana Rao et al. (2008) 通过实际观测资料, 指出亚洲季风区 TST 过程可能存在上述两个过程, 即对流抬升一定高度后的大尺度垂

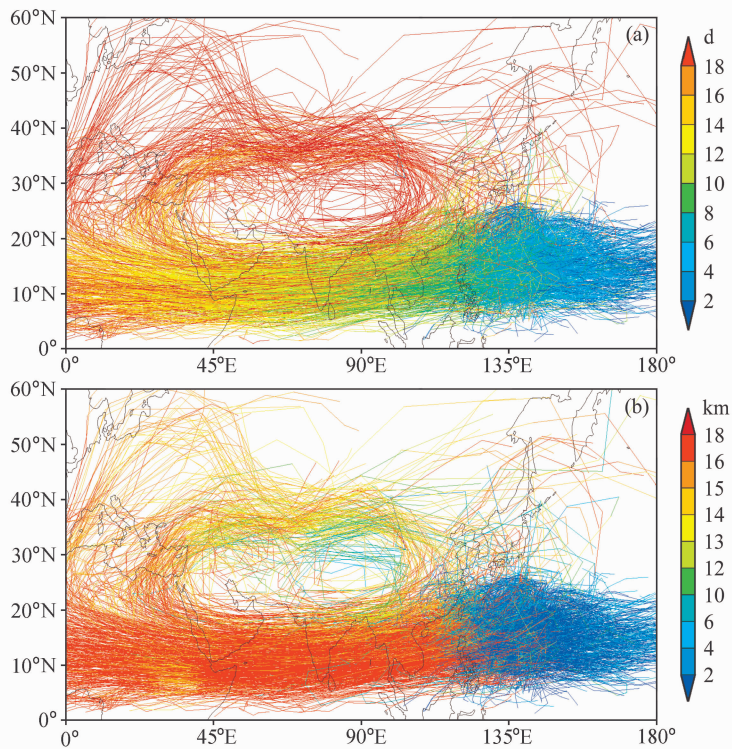


图 6 2005 年 6~8 月到达对流层顶或者以上高度而源于热带西太平洋地区边界层内的气块运动轨迹: (a) 气块的释放时间; (b) 气块高度  
Fig. 6 The trajectories for the air parcels leaving the WPO boundary layer that subsequently arrive at the tropopause or above levels for the summer of 2005. The colors represent (a) the release time and (b) the height of air parcels

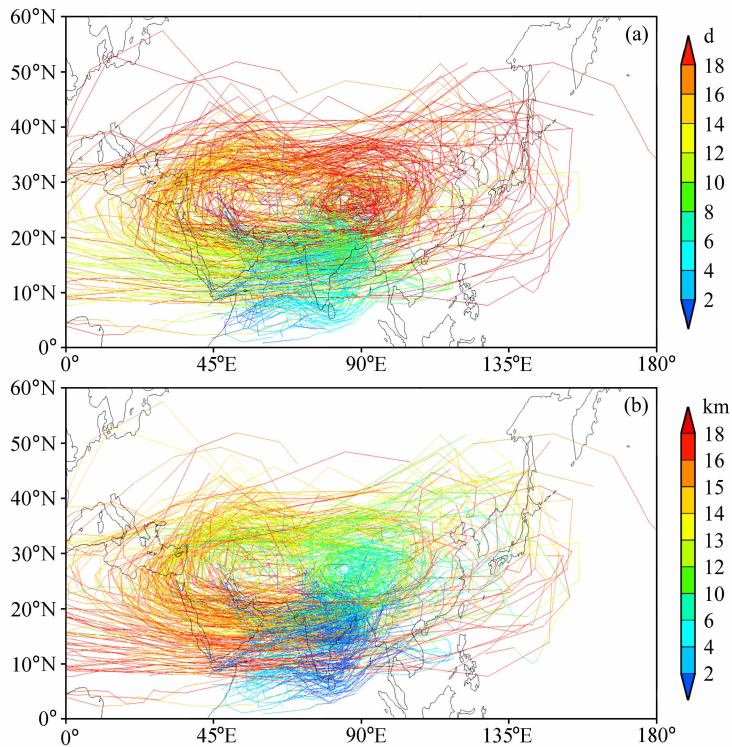


图 7 同图 6, 但为青藏高原及其南部区域  
Fig. 7 Same as Fig. 6, but for the Tibetan Plateau and its southern areas

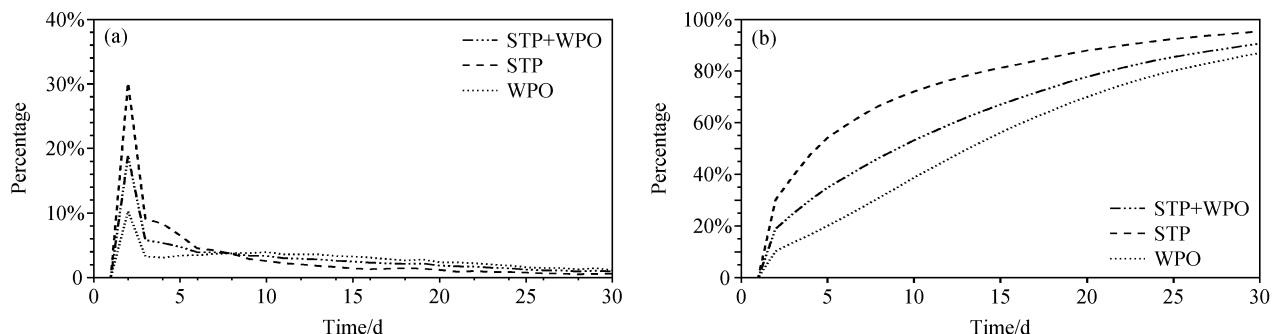


图 8 根据 2005 年夏季气块模拟轨迹计算的不同时间尺度的输送占输送总量的百分比 (a) 和累积百分比 (b) 变化

Fig. 8 (a) The percent and (b) the cumulative percent of the transport for different time scales to the total transport based on the ensemble air parcel trajectories for the summer of 2005

直输送过程。结合我们给出的分析结果,可以清晰地看到亚洲季风区从大气边界层输送到平流层有两个主要的过程,时间尺度小于 2 天的进入平流层输送过程主要和夏季对流抬升有关,贡献了 10%~30%。虽然这只是占整个夏季 TST 的很小一部分,但是其作用也不可忽视。这个过程是一个快速的输送过程,可以使得近地层的大气污染物直接输送到平流层中。近年来南亚地区,尤其是印度及其附近的东南亚国家发展迅速,人为排放的大气污染物增加,这一输送过程就具有更为重要的意义。同时也可以看到,和 WPO 相比,STP 输送到对流层顶高度所需要的平均时间略短,估计这可能与对流抬升以后,青藏高原及其周边区域距离夏季亚洲季风区平流层的“入口区”(图 5)较近有关,同样,其详细的机制也需要进一步探讨。但是,总体而言,可以初步判断源于近地层短生命周期的大气污染物在很短的时间内进入平流层之后,可能通过光化学反应过程对该区域平流层臭氧等痕量成分平衡产生重要影响。

## 6 结论与讨论

基于 NCEP 资料作为大气驱动资料,利用拉格朗日轨迹输送模式研究了亚洲季风区 2005 年夏季大气近地层向对流层顶区、平流层的输送过程。首先,将  $0^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{N}$ ,  $0^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$  区域高度为 0.2~22 km 的三维大气划分为 100 万个小的空气粒子(小空气块),模拟整个区域中所有空气粒子的三维轨迹,并记录其空间位置及其他相关信息,然后,挑选对模拟时间段内穿过亚洲季风区主体区域( $0^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ ,  $20^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ )的对流层顶高度的空气粒子群进行分

析,通过空气粒子群(小空气块)后向轨迹计算,初步探讨了亚洲区夏季对流层向平流层大气质量输送(TST)的主要路径、时间尺度以及源区。总结全文,可以初步得到以下主要结论:

(1) 进入亚洲夏季风平流层中的大气来源于近地层的两个主要源区,一个是热带西太平洋以及中国南海区域,另一个是青藏高原及其南部的孟加拉湾、印度洋、印度半岛东北部及其中南半岛区域,这两个区域和亚洲区域近地层夏季强对流的分布位置相吻合。不同高度上的轨迹模拟分析表明,这两个区域对 16 km 对流层顶高度附近的大气输送贡献相当,而随着高度增加,WPO 的贡献减少,STP 区域的贡献增加,能够进入到平流层“Overworld”区域主要源于 STP (约 75%),但是青藏高原地区的大气输送为什么在穿越对流层顶以后能够输送到更高的高度,这个问题需要进一步地加以深入研究。

(2) 抬升的近低层大气污染物在青藏高原东南侧附近区域进入平流层下部,在东风急流的输送及其南亚高压的共同影响,一部分近地层大气污染物可以向西输送,同时也有一部分近地层大气进入到南亚高压内部。总体而言,夏季从近地层输送到平流层的大气输送的典型路径主要受到高层南亚高压反气旋闭合环流、热带东风急流和中纬度西风急流共同作用的影响。

(3) 亚洲季风区从大气边界层输送到平流层有两个主要的过程,一个是和夏季湿对流抬升直接联系的快速输送过程,它可以使得近地层大气在 1~2 天内输送到平流层中,其贡献了整个 TST 的 10%~30%,另外一个是和大气辐射加热产生的大尺度垂直输送相关的慢过程,其时间尺度一般为 5~30

天。由于南亚高压的存在,使得源地地表的大气污染物可能停留在此区域时间超过 1 个月 (Park et al., 2007)。此结果表明,源于地表的短生命周期的大气污染物可能通过光化学反应过程对该区域平流层臭氧及其他大气痕量成分平衡产生重要影响。

需要指出的是,轨迹模式模拟精度除了受到模式本身计算的影响外,还受到输入驱动气象资料精度,尤其是对流层向平流层大气输送过程中垂直速度的影响,使得计算结果具有某种程度上不可克服的误差,但是这里的研究还是给出了一个较好的定性分析结果。另外,模式中采用的对流参数化方案亦优于过去简单的轨迹模式计算,对中小尺度的对流和湍流过程加以考虑。

另外,本文研究只是基于 2005 年夏季的模拟研究,时间较短,且大气环流具有多尺度的变化特征,如受到 ENSO 循环的影响。是否不同年份其 TST 的差异有多大,以后还需要做进一步的检验和验证。

### 参考文献 (References)

- Berthet G, Esler J G, Haynes P H. 2007. A Lagrangian perspective of the tropopause and the ventilation of the lowermost stratosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, D18102, doi: 10.1029/2006JD008295.
- 毕云, 陈月娟, 周任君, 等. 2008. 青藏高原上空  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  的分布和变化趋势分析 [J]. *高原气象*, 27 (2): 249–258. Bi Yun, Chen Yuejuan, Zhou Renjun, et al. 2008. Study on  $\text{H}_2\text{O}$  and  $\text{CH}_4$  distributions and variations over Qinghai–Xizang Plateau using HALOE data [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (2): 249–258.
- 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, 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 (II)* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 257–273.
- Bonazzola M, Haynes P H. 2004. A trajectory-based study of the tropical tropopause region [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, doi: 10.1029/2003JD004356.
- Bridgeman C H, Pyle J A, Shallcross D E. 2000. A three dimensional model calculation of the ozone depletion potential of 1-bromopropane ( $1-\text{C}_3\text{H}_7\text{Br}$ ) [J]. *J. Geophys. Res.*, 105 (D21): 26493–26502.
- 陈洪滨, 卞建春, 吕达仁. 2006. 上对流层一下平流层交换过程研究的进展与展望 [J]. *大气科学*, 30 (5): 813–820. Chen Hongbin, Bian Jianchun, Lü Daren. 2006. Advances and prospects in the study of stratosphere–troposphere exchange [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 813–820.
- 陈月娟, 施春华. 2005. 从 HALOE 资料看青藏高原上空 HCl 分布及其与  $\text{O}_3$  的关系 [J]. *高原气象*, 24 (1): 1–8. Chen Yuejuan, Shi Chunhua. 2005. Study on HCl distribution and its relation to ozone over Qinghai–Xizang Plateau using HALOE data [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 24 (1): 1–8.
- 丛春华, 李维亮, 周秀骥. 2001. 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 (22): 1914–1918. Cong Chunhua, Li Weiliang, Zhou Xiujie. 2001. Mass exchange between stratosphere and troposphere over the Tibetan Plateau and its surroundings [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 46 (22): 1914–1918.
- Dessler A E, Sherwood S C. 2004. The effect of convection on the summertime extratropical lower stratosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, D23301, doi: 10.1029/2004JD005209.
- Dethof A, O'Neill A, Slingo J M, et al. 1999. A mechanism for moistening the lower stratosphere involving the Asian summer monsoon [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 125: 1079–1106.
- 樊雯璇, 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 (6): 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 (6): 1309–1318.
- Forster C, Wandler U, Wotawa G. 2001. Transport of boreal forest fire emissions from Canada to Europe [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D19): 22887–22906.
- Forster C, Stohl A, Seibert P. 2007. Parameterization of convective transport in a Lagrangian particle dispersion model and its evaluation [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46: 403–422.
- 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.
- Fueglistaler S, Wernli H, Peter T. 2004. Tropical troposphere-to-stratosphere transport inferred from trajectory calculations [J]. *J. Geophys. Res.*, 109, D03108, doi: 10.1029/2003JD004069.
- Fueglistaler S, Bonazzola M, Haynes P H, et al. 2005. Stratospheric water vapor predicted from the Lagrangian temperature history of air entering the stratosphere in the tropics [J]. *J. Geophys. Res.*, 110, D08107, doi: 10.1029/2004JD005516.
- Gettelman A, Salby M L, Sassi F. 2002. Distribution and influence of convection in the tropical tropopause region [J]. *J. Geophys. Res.*, 107 (D10), 4080, doi: 10.1029/2001JD001048.
- 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.
- Hatsushika H, Yamazaki K. 2003. Stratospheric drain over Indonesia and dehydration within the tropical tropopause layer diagnosed by air parcel trajectories [J]. *J. Geophys. Res.*, 108 (D19), 4610, doi: 10.1029/2002JD002986.

- Highwood E J, Hoskins B J. 1998. The tropical tropopause [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 124 (549): 1579–1604.
- Hoinka K P. 1997. The tropopause: Discovery, definition and demarcation [J]. Meteorol. Z., 6: 281–303.
- Holton J R, Gettelman A. 2001. Horizontal transport and the dehydration of the stratosphere [J]. Geophys. Res. Lett., 28 (14): 2799–2802.
- Hoskins B J, Rodwell M J. 1995. A model of the Asian summer monsoon. Part I: The global scale [J]. J. Atmos. Sci., 52: 1329–1340.
- James P, Stohl A, Forster C, et al. 2003. A 15-year climatology of stratosphere-troposphere exchange with a Lagrangian particle dispersion model: 1. Methodology and validation [J]. J. Geophys. Res. 108 (D12), 8519, doi: 10.1029/2002JD002637.
- Lelieveld J, Berresheim H, Borrmann S. 2002. Global air pollution crossroads over the Mediterranean [J]. Science, 298: 794–799.
- Levine J G, Braesicke P, Harris N R, et al. 2007. Pathways and timescales for troposphere-to-stratosphere transport via the tropical tropopause layer and their relevance for very short lived substances [J]. J. Geophys. Res., 112, D04308, doi: 10.1029/2005JD006940.
- Li Q, Jiang J H, Wu D L. 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.
- 吕达仁, 陈泽宇, 卞建春, 等. 2008. 平流层—对流层相互作用的多尺度过程特征及其与天气气候关系研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 782–793. Lü Daren, Chen Zeyu, Bian Jianchun, et al. 2008. Advances in researches on the characteristics of multi-scale processes of interactions between the stratosphere and the troposphere and its relations with weather and climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 782–793.
- Narayana Rao T, Uma K N, Narayana Rao D, et al. 2008. Understanding the transportation process of tropospheric air entering the stratosphere from direct vertical air motion measurements over Gadanki and Kototabang [J]. Geophys. Res. Lett., 35, L15805, doi: 10.1029/2008GL034220.
- 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.
- 邓淑梅, 陈月娟, 罗涛, 等. 2009. 平流层爆发性增温过程中臭氧的垂直分布特征 [J]. 大气科学, 33 (3): 459–467. Deng Shumei, Chen Yuejuan, Luo Tao, et al. 2009. The vertical distribution characteristics of ozone during stratospheric sudden warming [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 459–467.
- 陆春晖, 刘毅, 陈月娟, 等. 2009. 2003~2004 年冬季平流层爆发性增温动力诊断分析 [J]. 大气科学, 33 (4): 726–736. Lu Chunhui, Liu Yi, Chen Yuejuan, et al. A dynamical diagnosis of stratospheric sudden warming in 2003–2004 winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 726–736.
- Pfeilsticker K, Sturges W T, Bösch H C. 2000. Lower stratospheric organic and inorganic bromine budget for the arctic winter 1998/99 [J]. Geophys. Res. Lett., 27: 3305–3308.
- Salawitch R J, Weisenstein D K, Kovalenko L J, et al. 2005. Sensitivity of ozone to bromine in the lower stratosphere [J]. Geophys. Res. Lett., 32, L05811, doi: 10.1029/2004GL021504.
- Stohl A, Thomson D J. 1999. A density correction for Lagrangian particle dispersion models [J]. Bound.-Layer Meteor., 90: 155–167.
- Stohl A, Bonasoni P, Collins W, et al. 2003. Stratosphere–troposphere exchange: A review, and what we have learned from STACCATO [J]. J. Geophys. Res., 108 (D12), 8516, doi: 10.1029/2002JD002490.
- Stohl A, Forster C, Frank A, et al. 2005. Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2 [J]. Atmos. Chem. Phys., 5: 2461–2474.
- 苏东玉, 李跃清, 蒋兴文. 2006. 南亚高压的研究进展及展望 [J]. 干旱气象, 24 (3): 68–74. Su Dongyu, Li Yueqing, Jiang Xinwen. 2006. Research advance on the South Asia high [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 24 (3): 68–74.
- 吴国雄, 刘新, 张琼, 等. 2002. 青藏高原抬升加热气候效应研究的新进展 [J]. 气候与环境研究, 7 (2): 184–201. Wu Guoxiong, Liu Xin, Zhang Qiong, et al. 2002. Progresses in the study of the climate impacts of the elevated heating over the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7 (2): 184–201.
- 徐祥德, 周明煜, 陈家宜, 等. 2001. 青藏高原地一气过程动力、热力结构综合物理图象 [J]. 中国科学 (D辑), 31 (5): 428–440.
- Xu Xiangde, Zhou Mingyu, Chen Jiayi, et al. 2001. A comprehensive physical pattern of land-air dynamic and thermal structure on the Qinghai–Xizang Plateau [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 31 (5): 428–440.
- 杨健, 吕达仁. 2004. 2000 年北半球平流层、对流层质量交换的季节变化 [J]. 大气科学, 28 (2): 294–300. Yang Jian, Lü Daren. 2004. Diagnosed seasonal variation of stratosphere–troposphere exchange in the Northern Hemisphere by 2000 data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (2): 294–300.
- 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 Xiuj, Luo Chao, Li Weiliang, et al. 1995. The column ozone variation in China and the low value centre over Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 40 (15): 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 (5): 513–527. Zhou Xiuj, Li Weiliang, Chen Longxun, et al. 2004. Study of ozone change over Tibetan Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (5): 513–527.