

陈斌,徐祥德,杨帅等. 夏季青藏高原地区近地层水汽进入平流层的特征分析. 地球物理学报, 2012, 55(2): 406-414, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.005.

Chen B, Xu X D, Yang S, et al. On the characteristics of water vapor transport from atmosphere boundary layer to stratosphere over Tibetan Plateau regions in summer. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(2): 406-414, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.005.

## 夏季青藏高原地区近地层水汽 进入平流层的特征分析

陈 斌<sup>1</sup>, 徐祥德<sup>1</sup>, 杨 帅<sup>2</sup>, 卞建春<sup>3</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 中国科学院大气物理研究所 云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

3 中国科学院大气物理研究所 中层大气和全球环境探测实验室, 北京 100029

**摘 要** 青藏高原为亚洲季风区的典型代表区域, 研究其水汽进入平流层的过程和机理对认识全球气候和大气环境变化具有一定的现实意义. 本文基于中尺度气象模式(WRF)的模拟输出结果(2006年8月20日至8月26)驱动拉格朗日大气输送模式 FLEXPART, 通过追踪并解析气块的三维轨迹以及温度、湿度等相关物理量的相关变化特征, 初步分析了夏季青藏高原地区近地层-对流层-平流层的水汽输送特征. 研究表明, 源于高原地区近地层的水汽在进入平流层的过程中受南亚高压影响下的大尺度环流和中小尺度对流的共同影响. 首先, 在对流抬升作用下, 气块在短时间内(24 h)可抬升到 9~12 km 的高度, 然后在南亚高压闭合环流影响下, 相当部分气块在反气旋的东南侧穿越对流层顶进入平流层中, 并继续向低纬热带平流层输送, 进而参与全球对流层-平流层的水汽循环过程. 在对流抬升高度上气块位置位于高原的西北侧, 然而气块拉格朗日温度最小值主要分布于高原南侧, 两个位置上气块的平均位温差值可达 15~35 K, 这种显著的温度差异将导致气块进入平流层时“脱水”. 比较而言, 夏季青藏高原地区近地层水汽进入平流层的多寡主要和大尺度汽流的垂直输送有关, 而深对流的作用相对较弱.

**关键词** 青藏高原, 平流层, 水汽输送

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.02.005

中图分类号 P412

收稿日期 2011-03-09, 2011-12-26 收修定稿

### On the characteristics of water vapor transport from atmosphere boundary layer to stratosphere over Tibetan Plateau regions in summer

CHEN Bin<sup>1</sup>, XU Xiang-De<sup>1</sup>, YANG Shuai<sup>2</sup>, BIAN Jian-Chun<sup>3</sup>

1 State Key Laboratory of Severe Weather (LaSW), Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

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

**Abstract** Identification of the main mechanism of water vapor transportation from atmosphere surface layer into stratosphere over Asian monsoon region, especially for the region of Tibetan Plateau (TP), plays a significant role in understanding the global climate change and global

**基金项目** 国家自然科学基金项目(41105027, 41130960), 科技部社会公益研究专项(GYHY201006009), 国家重点基础研究发展计划(2010CB428602)和中国博士后基金项目(20110490488)资助.

**作者简介** 陈斌, 男, 1977年生, 博士, 主要从事大气环境变化与气候效应研究. E-mail: chenbin@cams.cma.gov.cn

environment. In order to investigate the possible mechanism of water vapor transportation from the surface layer to upper troposphere and stratosphere, we used the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART driven by the hourly output generated by the weather research and forecasting (WRF) model for the period from 20 to 26 August, 2006. Based on the three-dimensional trajectories backward tracing analysis and their changes in temperature, humidity and other physical variables, our results show that small-scale convection lift and the large-scale transportation are the two main factors responsible for the water vapor entry from surface layer to stratosphere. Air parcels from the surface layer could be lifted up to 9~12 km height via active convection within 24 hours, and then passed through the tropopause in the Tibetan Plateau southeast, which was driven by the large scale advection associated with the south Asian anticyclone circulation. Most air parcels could further transport to lower latitudes and impact the global troposphere-stratosphere water vapor budget. Air parcels on the cloud top height were largely located over the northwest of TP, whereas their locations of Lagrangian minimum temperature, i. e., where the air parcels dehydration happened, were mostly located in the south of TP. The potential temperature difference between these two regions is about 15~35 K, implying a significant dehydration processes for all air parcels. This result indicates that the mechanism of water vapor transportation from atmosphere surface layer to stratosphere over Tibetan Plateau regions in summer is potentially controlled by large scale circulation associated with southern Asian monsoon, while the small scale circulation caused by convections plays a secondary role.

**Keywords** Tibetan Plateau, Stratosphere, Water vapor transport

## 1 引言

平流层中水汽作为一种极为重要的温室气体,其含量变化产生的辐射强迫将改变整个地-气系统的能量平衡,进而对全球气候变化产生影响<sup>[1]</sup>,过去由于观测资料匮乏,并没有得到很多关注.最近有研究指出<sup>[2-5]</sup>,平流层中水汽含量有增加的趋势,而其变化原因目前还不清楚.由于平流层水汽大多源于对流层的输送,所以,对流层水汽进入平流层的过程及相关机制研究,是目前全球变化研究中一个新兴的热点问题<sup>[6-9]</sup>.

亚洲季风区,尤其以青藏高原为代表的区域是对流层向平流层物质输送的重要窗口,在全球对流层-平流层相互作用过程中扮演着重要的角色<sup>[10-15]</sup>,甚至该区域向平流层输送的大气污染总量都强于整个热带地区<sup>[16]</sup>.发生在该区域对流层顶附近的水汽输送过程研究亦获得了较为广泛的关注<sup>[17-19]</sup>.基于最新卫星资料分析,Fu等<sup>[20]</sup>进一步强调了青藏高原区域对流活动的重要性,认为青藏高原是亚洲季风区水汽进入平流层的重要通道,其水汽输送对全球平流层水汽平衡具有影响.诊断分析研究亦表明,

青藏高原及其周边区域是亚洲季风区夏季平流层水汽的一个重要源区<sup>[21]</sup>.因此,夏季青藏高原地区的对流层水汽如何进入平流层相关问题的研究,对评估平流层水汽变化对亚洲乃至全球气候影响具有科学价值和现实意义.

目前来看,控制对流层水汽进入下平流层的机制还存在较大争议.一方面,快速的中小尺度对流抬升、加湿作用在水汽向平流层输送过程的重要性已获得了学者们的广泛认同<sup>[6-9]</sup>.另外一方面,亦有学者认为,在亚洲季风区夏季上对流层-下平流层中,水汽异常的大值中心和对流活动在时空变化上并不一致,这意味着除了深对流的影响外,大尺度水平和垂直输送过程的影响亦不可以忽略<sup>[18]</sup>.James等<sup>[19]</sup>认为在100 hPa高度上,大尺度平流的输送影响过程要强于对流输送.

过去研究主要侧重于上对流层向平流层的水汽输送过程,针对近地层水汽源区输送过程的研究还较少.源于高原大气行星边界层高度以下的近地层水汽进入平流层的可能机理是什么?大尺度的输送过程与中小尺度的对流系统的相对重要性如何?这些问题的研究无疑将有助于正确认识亚洲季风区水汽输送过程在全球对流层-平流层水汽平衡中地位

的新认识.

鉴于上述研究的重要性和目前研究不足,本文将采用中尺度气象模式和拉格朗日轨迹模式相结合的数值模拟方法,根据气块三维轨迹追踪分析方法,对高原地区近地层水汽进入上对流层以及平流层过程进行整体分析,以期对深入理解该区域近地层的水汽进入平流层的机理提供有意义的参考.

## 2 资料和模拟方案

### 2.1 WRF 模式及模拟方案设置

AIRS 探测资料和 NCEP/GFS 资料都显示(图略),在 2006 年 8 月 21 日至 8 月 26 日南亚反气旋内 100 hPa 高度上,在青藏高原及其周边区域上空存在一个水汽分布的异常大值区域. 所以本文利用 WRF 模式对 2006 年 8 月 20 日 00 时~27 日 00 时的天气过程进行模拟.

这里 WRF 模式的边界条件和初始条件为水平分辨率  $1^\circ \times 1^\circ$ 、时间分辨率 6h 的 NCEP 全球预报系统分析资料所提供,模式积分区域中心为 ( $90^\circ\text{E}$ ,  $25^\circ\text{N}$ ),格点数为  $291 \times 181$ ,水平格距为 27 km,垂直方向分为 31 个不等距  $\sigma$  层. 模式积分时间为 2006 年 8 月 20 日 00 时至 8 月 26 日 00 时,时间积分步长 30 s,模式每 1 个小时输出一次. WRF 模式采用全可压、非静力方程和 Arakawa-C 格点. 选用质量坐标(Eulerian mass coordinate),Runge-Kutta 的三阶时间积分方案,微物理过程运用 Ferrier 方案和 Kain-Fritsch 积云对流参数化方案;同时采用 MRF 边界层方案、Dudhia 短波辐射和 RRTM 长波辐射方案.

### 2.2 拉格朗日输送模式及模拟方案设置

Lagrangian 粒子轨迹-扩散模式 FLEXPART 通过计算气块(群)的运动轨迹,进而实现对大气物质的输送和扩散过程的描述. 目前已被广泛应用于中尺度输送过程研究、大气水份循环、对流层-平流层交换以及全球污染物的输送等多方面研究. 此模式的优点是具有多个可插拔的数据接口,采用的对流参数化方案对中小尺度的对流过程加以考虑,亦使得垂直方向上输送过程的模拟优于过去简单的轨迹模式计算. 由于篇幅所限,这里关于该模式及采用技术的详细介绍可参见文献[22].

FLEXPART 模式的输入资料由 WRF 模式输出的逐时模拟结果提供. 模拟之初,根据大气密度的空间分布,将经纬度范围为  $55^\circ\text{E} \sim 145^\circ\text{E}$ 、 $5^\circ\text{N} \sim$

$45^\circ\text{N}$ ,垂直方向上高度范围为 0.1~20 km 的整个三维区域均匀划分为相对均匀的 150 万个气块(粒子). 模拟积分过程中,粒子总数大致保持不变,在模拟的边界区域上,根据边界上物质通量的大小,粒子在流入边界上产生或消亡. 模式积分时间步长为 30 s,模拟结果每 1 h 输出一次. 模拟结果可以输出每个空气“气块”的空间三维位置,并根据气块的位置,通过再分析资料的空间插值获取每个气块运动过程中的其他物理信息,如位涡、比湿、温度、边界层高度以及对流层顶高度等.

## 3 输送过程分析

### 3.1 不同高度的输送“源区”

针对这次天气尺度输送过程,为说明问题方便,首先,我们挑选出在模拟时段内从大气行星边界层输送到  $70^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$ ,  $15^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$ (和南亚高压的大体位置相当)平流层中的气块为分析对象,然后将气块在不同高度上的空间位置定义为相应高度的输送源区. 这里输送源区的确定方法和对流层顶高度定义分别可参见文献[15]和[24].

通过气块三维轨迹分析,进一步挑选出初始时刻位于 8 km 高度和对流层顶高度之间,且在模拟时段内向上穿越对流层顶的气块. 图 1 给出了模拟初始时刻位于 8 km 和对流层顶高度之间(图 1a)和位于边界层高度之上和 8 km 之间(图 1b),且最终进入平流层的气块在模拟初始时刻的空间分布. 可以看到在整个模拟时段内,8 km 高度以上进入平流层的质量源区主要和南亚高压控制下的反气旋环流系统相一致,其主要包括青藏高原、孟加拉湾北部、中国东部等大范围区域. 而从 8 km 高度以下且边界层高度以上的大气进入平流层的质量“源区”主要位于孟加拉湾北部、印度半岛东北部地区,其他两个次要的输送源区主要位于青藏高原和中国的南海地区,此分布特征应该和上对流层向下平流层的质量输送分布大体相当,如与文献[25]和[26]给出的研究结果相似.

但是,上述源区的确定没有考虑气块输送过程中水汽含量的变化,由于气块穿越冷的对流层顶高度时,气块要经历一个冻干脱水的过程<sup>[27]</sup>. 若考虑进入平流层的水汽的对流源区,则需要剔除掉那些虽然进入了对平流层,但却对水汽贡献不大的气块. 所以,这里进一步挑选源于大气行星边界层高度以下,且进入平流层后比湿大于  $2 \times 10^{-4} \text{ kg/kg}$  的气

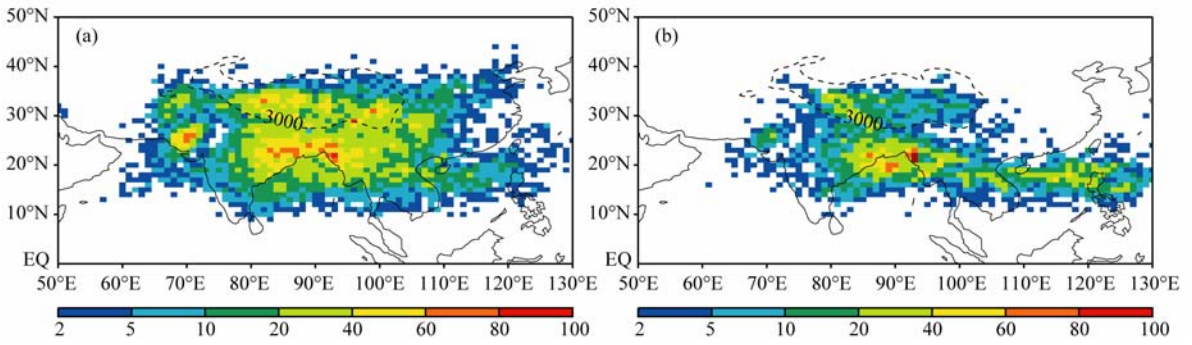


图1 模拟初始时刻位于上对流层(8 km)和对流层顶高度之间(a)和位于边界层高度之上和上对流层(8 km)之间(b), 且最终进入平流层的气块在模拟初始时刻的空间分布. 其中虚线表示 3 km 地形高度.

Fig. 1 The spatial distribution of air parcels entered the stratosphere at the end of simulation, but located in the layer between altitude of 8 km and tropopause at the beginning(a) and between the boundary layer and altitude of 8 km (b). The dash line indicates the elevation higher than 3 km.

块. 需要说明的是, 这里气块的选取标准可能并不代表所有对平流层的贡献, 但这里选取典型的气块的主要目的是分析其输送过程和机制.

图2给出了气块在模拟初始时刻的分布, 可以看到, 和图1中根据不同的挑选标准给出的分布有较大差别, 源于青藏高原边界层高度以下且进入平流层的近地层的气块数目大大减少, 主要分布于青藏高原的西部, 当然也有一些分布在高原东侧等地区. 由于本文研究目标是确定源于近地层的水汽进入平流层的输送特征和机理, 正是这些从近地层进入到平流层的气块, 可以代表整个垂直方向上的水汽进入平流层的输送过程. 因此, 下文将继续以这些气块为目标气块, 进一步分析其进入平流层的输送机理.

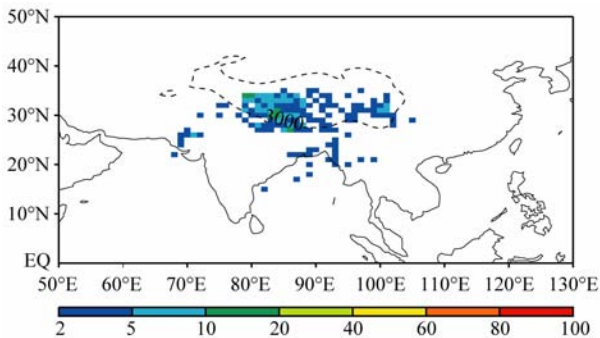


图2 模拟初始时刻源于行星边界层高度以下, 且最终进入平流层的气块后比湿大于  $2 \times 10^{-4}$  kg/kg 气块在模拟初始时刻的空间分布. 其中虚线表示 3 km 地形高度.

Fig. 2 Spatial distribution of air parcels entered the stratosphere with a specific humidity larger  $2 \times 10^{-4}$  kg/kg after crossing the tropopause, but below the atmosphere boundary layer at the beginning of simulation. The dash line indicates the elevation higher than 3 km.

### 3.2 水汽输送轨迹分析

图3给出了目标气块在模拟时段内的三维输送轨迹, 其中气块轨迹采样每10个画一次, 图3a中颜色表示时间变化, 图中3b颜色表示高度. 分析图3a可见, 青藏高原地区源于近地层的气块在24 h内就可以抬升到9~12 km的高度. 过去研究已经表明, 南亚高压控制下的亚洲季风区对流层顶附近CO<sub>2</sub>、臭氧等异常大值区的变化和夏季低层的深对流活动有关<sup>[18,20,28-29]</sup>. 因此, 这里气块在短时间内抬升如此高的速度, 亦说明对流抬升的作用影响较大.

综合图3a和图3b可以看出, 青藏高原地区源于近地层的气块在对流作用下抬升, 并向西北方向运动. 在4 km左右南亚高压闭合环流的作用开始显著, 气块呈现螺旋式上升. 此后, 除了在反气旋的东北侧小部分气块在高空西风带的作用下, 向东向的高纬地区输送外, 绝大部分气块在反气旋的东南侧脱水进入16 km高度以上的低纬热带平流层中. 需要指出的是, 高原区域的水汽向上输送可以进入“热带管”<sup>[30]</sup>中, 参与全球对流层-平流层水汽循环中, 因此对全球平流层水汽多寡的影响是不言而喻的, 但是对全球平流层水汽总量平衡的影响程度如何, 将是将来需要深入研究的一个内容.

综上所述, 近地层水汽首先在对流作用下抬升, 然后在南亚反气旋大尺度水平及其垂直方向的输送作用下, 在反气旋的东侧进入低纬平流层. 一方面表明, 青藏高原地区是进入平流层水汽输送的重要对流源区, 同样也可以看出, 高原地区的水汽要受到南亚高压的影响. 但就目前研究情况而言, 亚洲季风区进入大气进入平流层的输送过程及机理还存在一定争议, 如 Dessler 和 Sherwood<sup>[29]</sup>强调了深对流活动

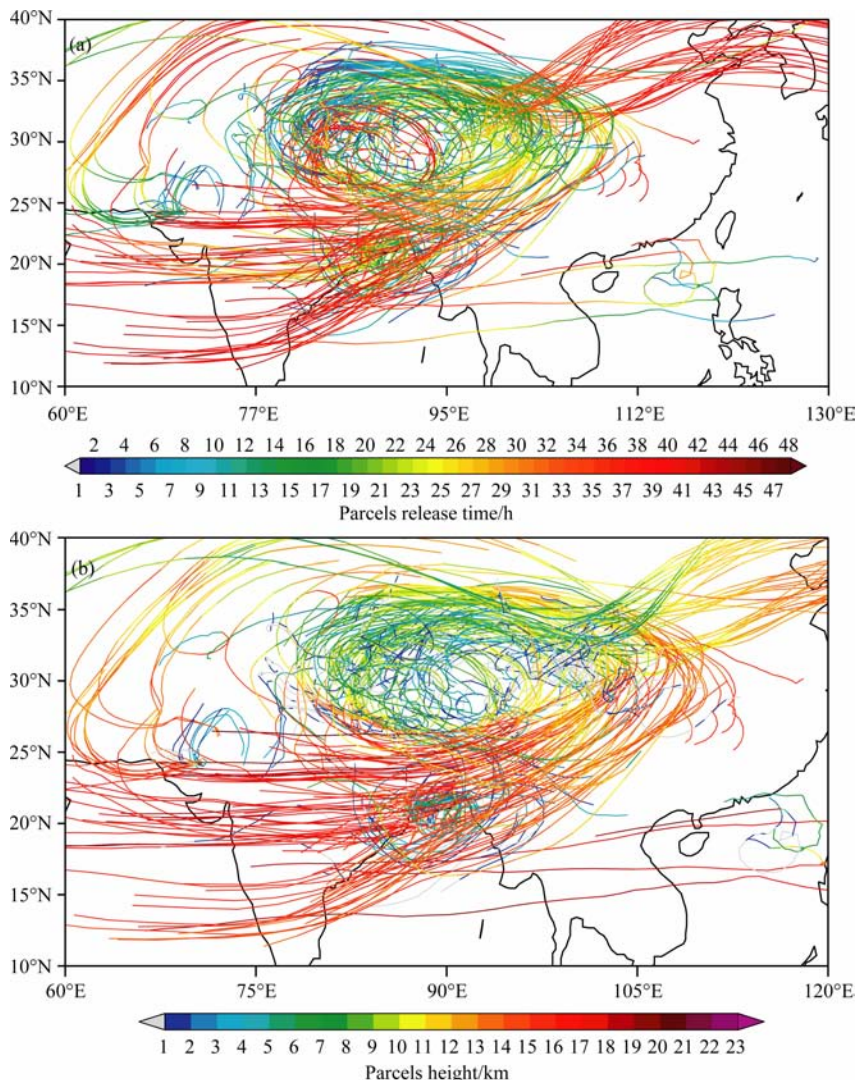


图3 模拟初始时刻源于行星边界层高度以下,而在模拟结束时刻进入平流层高度且比湿大于 $2 \times 10^{-4} \text{ kg/kg}$ 气块在模拟时段内的运动轨迹(其中图(a)中颜色表示时间变化,(b)图中颜色表示高度变化).

Fig. 3 The trajectories of air parcels described in Fig 2. The colors indicate the change of parcels release (a) time and (b) height.

的重要作用,但是深对流能够到达对流层顶高度的机会很少,还不足使得持续的异常得以维持<sup>[31]</sup>. Folkins 等<sup>[32]</sup>则指出,深对流的上方大尺度的垂直输送作用影响作用重大.那么,这里决定水汽进入平流层的关键因子是对流活动抬升作用还是大尺度环流的影响?这将在下文中进一步讨论.

### 3.3 大尺度抬升和中小尺度对流在输送过程中的作用

为分析大尺度抬升和中小尺度对流在输送过程中的作用,继续以模拟时段初始时刻源于行星边界层高度以下,而在模拟结束时刻进入 $70^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$ , $15^\circ\text{N} \sim 45^\circ\text{N}$ 范围平流层内且比湿大于 $2 \times 10^{-4} \text{ kg/kg}$ 气块为分析对象.这里采用的气块筛选标准可能使得气块数目相对较少,但鉴于本文目的是考察水汽

的输送过程和机制,这对对文中研究的结论不存在大的影响.

决定进入水汽进入平流层多寡的因素除了总的的质量输送以外,还和气块历经的拉格朗日最小温度有关<sup>[29]</sup>.以目标气块为分析对象,通过气块轨迹等信息,进一步比较气块在对流抬升作用下达到位置和气块具有拉格朗日最小温度时所处的位置(气块最后脱水的位置).云顶高度可以近似表征对流抬升所能影响的高度,因此,可用气块轨迹和云顶高度相交的位置表征对流抬升发生作用的高度.为了估算气块在对流抬升作用下所到达的位置,这里我们以大气红外探测器(AIRS)探测逐日云顶气压和NCEP/GFS再分析资料,通过插值方法确定云顶气压所在的近似高度.图4给出了AIRS卫星观测反

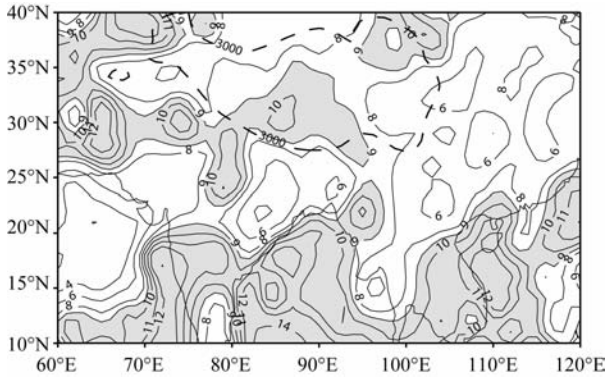


图4 AIRS 卫星观测的 2005 年 8 月 20~26 日平均云顶高度(单位:km). 图中阴影区表示云顶高度大于 9 km 区域.  
 Fig. 4 The average height of cloud top derived for AIRS satellite observation from 20 August to 26 August 2006 (unit in km). The shading areas indicates the regions where cloud top higher than 9 km.

演的 2005 年 8 月 20—26 日平均云顶高度分布,从中可以看到,孟加拉湾、印度洋、热带西太平洋以及青藏高原的中南部对流相对旺盛,相应地,云顶高度

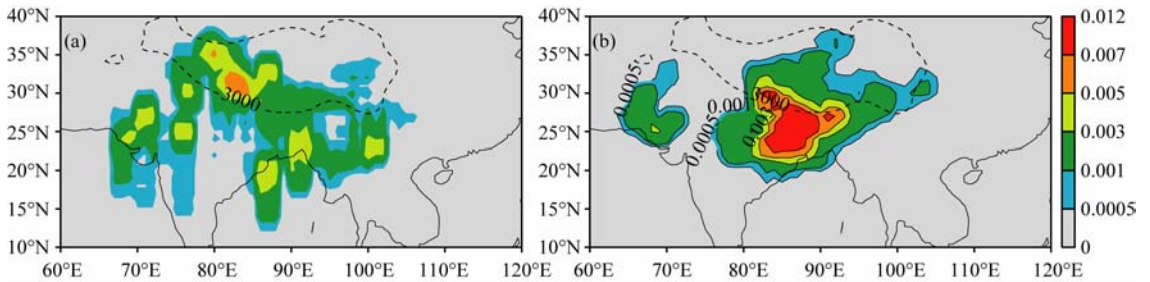


图5 气块轨迹和云顶高度相交位置 (a) 以及气块拉格朗日温度最小值(b)的空间概率密度空间分布. 其中虚线表示 3 km 地形高度.

Fig. 5 Distributions of intersections of trajectories with cloud tops (a) and the temperature minima experienced deduced from the trajectories tracking analysis. The dash line indicates the elevation higher than 3 km.

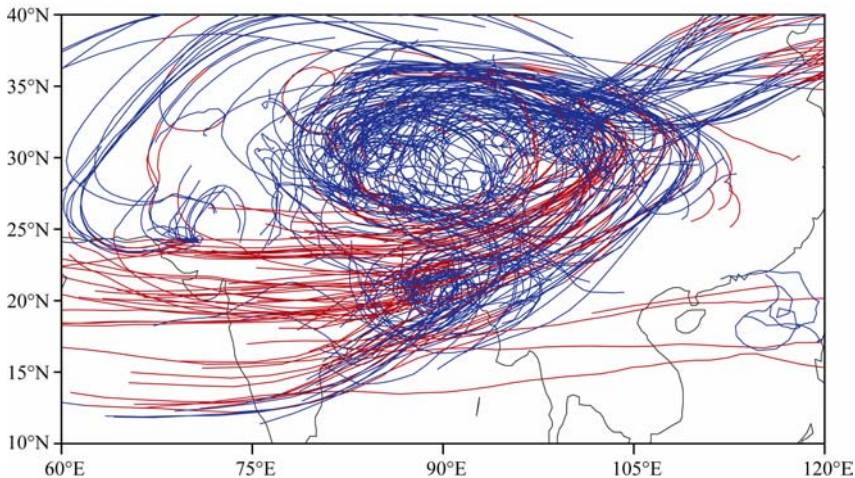


图6 同图 3(a),但其中轨迹蓝色代表位于对流层顶高度以下,红色代表位于对流层高度以上.

Fig. 6 The same as Fig. 3(a), but only blue and red color indicates where trajectories above and below the tropopause respectively

也较高.这也和过去的观测结果相吻合.

图 5 给出了气块轨迹和云顶高度相交位置以及气块拉格朗日温度最小值的空间概率密度空间分布.比较图 5a 和图 5b 可以看出,高原地区的近地层水汽主要在高原中西部到达对流抬升,其分布相对分散.结合气块穿越对流层顶的位置(图 6)可见,气块和云顶高度相交的位置还是停留在对流层中.而气块拉格朗日温度最小值的分布,即进入平流层后脱水的位置主要位于青藏高原南侧和孟加拉湾交界区的上空(图 5b).此两个分布在空间上相差较大,这说明进入青藏高原区域的水汽虽然初始时刻是在对流活动的影响下抬升,而进入平流层脱水的位置主要是受到大尺度环流输送影响.

进一步分析云顶高度和气块脱水高度上的气块位温概率密度分布(图 7)可以看到,气块在云顶高度的位温范围约 300~340 K,而气块脱水位置为 340~380 K,其位温平均值分别约为 325 K 和 360 K.在整体分布上位温重合区很少,这意味着气块在对

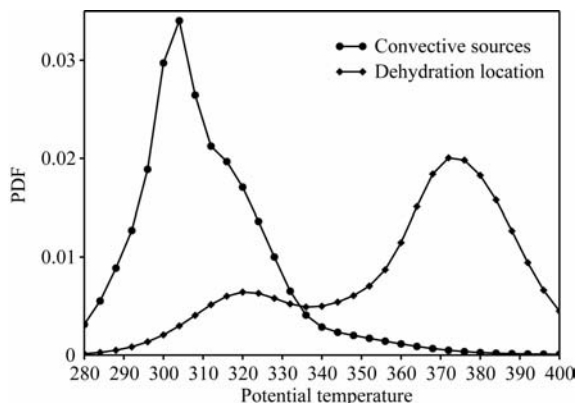


图 7 气块到达云顶高度和脱水高度的位温概率密度分布  
Fig. 7 Probability densities function of temperature where air parcels cross cloud top and where they are dehydrated

流的抬升作用下,达到位温 350 K 左右高度,然后是南亚高压反气旋内部大尺度输送过程,将气块输送到对流层顶的脱水高度,进入平流层中.当然,这里所谓的南亚高压反气旋内部大尺度输送,也不是整个南亚高压内部,而是接近平流层的反气旋东南侧上升运动. Park 等<sup>[18]</sup>通过诊断分析和大气环流模式模拟也给出了类似的垂直输送特征,并指出这种大尺度的上升运动可能源于冷的对流层顶之上的大气辐射加热所致.虽然 NCEP/GFS 资料并不能详细的描述中小尺度的对流运动,但从图 8 整个 2006 年夏季 100 hPa 高度上的垂直速度和水平风场分布上也可看到,在南亚反气旋的东侧和南侧存在较强的上升运动.南亚高压内部平流层水汽的异常大值中心维持及其输送主要是通过南亚高压控制下的大尺度的上升运动作用,而深对流加湿的影响较小.根据文献<sup>[19]</sup>的推断标准,这种温度偏差大小可以使得气块水汽质量混合比相差至少  $5 \times 10^{-6}$ .因此,可以进一步证实高原区域的水汽首先在夏季对流作用下抬升,然后在南亚高压反气旋等大尺度环流的垂

直输送作用下,脱水进入平流层中,而后的输送过程是影响水汽进入平流层多寡的决定因素.

## 4 结论和讨论

夏季青藏高原地区水汽进入平流层的机制对认识和预测东亚气候变化具有指导意义.本文结合中尺度气象模式和拉格朗日输送模式,以一次天气尺度的水汽输送过程为例,对该问题进行了初步分析.

总结全文,可以初步描绘出高原近地层水汽进入平流层的过程,即对流抬升携带的湿空气垂直方向上输送到位于 320~340 K 的高度,然后在南亚反气旋大尺度平流作用下,在反气旋的西侧向北输送;而在反气旋的东部及南侧经过对流层附近的“冷点”脱水,进入到平流层中.由于气块到达对流层顶位置和最后脱水位置的空间分布和温度相差很大,因此,比较而言,高原区域进入下平流层水汽的多少主要和南亚高压内部上升运动等大尺度环流相关,而深对流加湿等因素的影响较小.

需要指出的是,本研究是基于一次输送过程的模拟个例研究,本身的代表性并不充分,所以文中给出的结果还需要更多的模拟试验和观测资料来检验和验证.尤其是 WRF 模式虽然可以描述中尺度的对流,但是还不完善,因此,下一步的工作中借助于对对流活动具有更好描述的云分辨模式,通过更多对亚洲季风区夏季对流的多数值模拟,进一步探讨输送机制对于我们深入认识 UT/LS 水汽输送过程是必要的.同样,本文中使用的 AIRS 卫星探测资料反演的云顶高度存在一定的误差,在将来可以获得其他资料支持下,可进一步分析比较.另外,亚洲季风环流具有明显的年际及年代际变化,因此,对 ENSO 及其他因素影响下的强弱季风年中,近地层

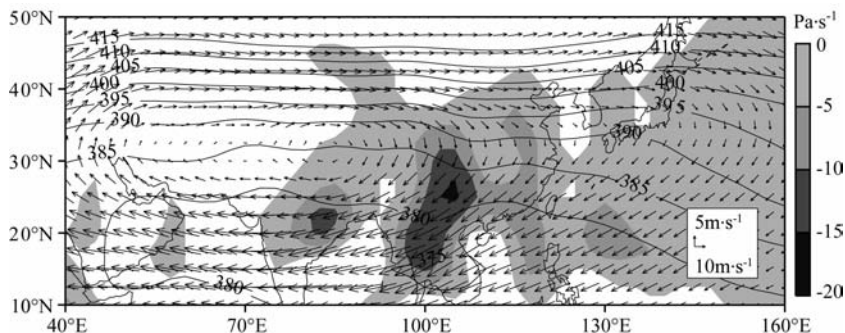


图 8 NCEP/GFS 分析资料中 2006 年夏季 6~8 月 100 hPa 高度上风速矢量和垂直速度分布(阴影区)  
Fig. 8 Wind vector, potential temperature and vertical speed (color shaded) on 100 hPa derived from NCEP/GFS analysis for the period from June to August of 2006

水汽向平流层输送的不同特征进行进一步的研究,也是以后需要加强的一个重要方面。

## 参考文献(References)

- [1] Sinha A, Harries J E. Water vapour and greenhouse trapping: The role of far infrared absorption. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, 22(16): 2147-2150.
- [2] Oltmans S J, Hofmann D J. Increase in lower-stratospheric water vapour at a mid-latitude Northern Hemisphere site from 1981 to 1994. *Nature*, 1995, 374(6518): 146-149, doi: 10.1038/374146a0.
- [3] Oltmans S J, Vömel H, Hofmann D J, et al. The increase in stratospheric water vapor from balloonborne, frostpoint hygrometer measurements at Washington, D. C., and Boulder, Colorado. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, 27(21): 3453-3456.
- [4] Rosenlof K H, Oltmans S J, Kley D, et al. Stratospheric water vapor increases over the past half-century. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, 28(7): 1195-1198.
- [5] Dethof A, O'Neill A, Slingo J M, et al. A mechanism for moistening the lower stratosphere involving the Asian summer monsoon. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 1999, 125(556): 1079-1106.
- [6] Nedoluha G E, Bevilacqua R M, Gomez R M, et al. An evaluation of trends in middle atmospheric water vapor as measured by HALOE, WVMS, and POAM. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(D13), 4391, doi: 10.1029/2002JD003332.
- [7] Rosenlof K H. How water enters the stratosphere. *Science*, 2003, 302(5651): 1691-1692.
- [8] Narayana Rao T, Uma K N, Narayana Rao D, et al. Understanding the transportation process of tropospheric air entering the stratosphere from direct vertical air motion measurements over Gadanki and Kototabang. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35, L15805, doi: 10.1029/2008GL034220.
- [9] Solomon S, Rosenlof K H, Portmann R W, et al. Contributions of Stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming. *Science*, 2010, 327(5970): 1219-1223.
- [10] 吕达仁, 陈泽宇, 卞建春等. 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. *大气科学*, 2008, 32(4): 782-793.  
Lü D R, Chen Z Y, Bian J C, et al. 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. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32(4): 782-793.
- [11] 陈洪滨, 卞建春, 吕达仁. 上对流层-下平流层交换过程研究的进展与展望. *大气科学*, 2006, 30(5): 813-820.  
Chen H B, Bian J C, Lü D R. Advances and prospects in the study of stratosphere-troposphere exchange. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, 30(5): 813-820.
- [12] 吕达仁, 卞建春, 陈洪滨等. 平流层大气过程研究的前沿与重要性. *地球科学进展*, 2009, 24(3): 221-228.  
Lü D R, Bian J C, Chen H B, et al. Frontiers and significance of research on stratospheric processes. *Advances in Earth Science* (in Chinese), 2009, 24(3): 221-228.
- [13] 杨健, 吕达仁. 2000年北半球平流层、对流层质量交换的季节变化. *大气科学*, 2004, 28(2): 294-300.  
Yang J, Lü D R. Diagnosed seasonal variation of stratosphere-troposphere exchange in the Northern Hemisphere by 2000 data. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, 28(2): 294-300.
- [14] 樊雯璇, 王卫国, 卞建春等. 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. *大气科学*, 2008, 32(6): 1309-1318.  
Fan W X, Wang W G, Bian J C, et al. The distribution of cross-tropopause mass flux over the Tibetan Plateau and Its surrounding regions. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32(6): 1309-1318.
- [15] 陈斌, 徐祥德, 卞建春等. 夏季亚洲季风区对流层—平流层不可逆质量交换特征分析. *地球物理学报*, 2010, 53(5): 1050-1059.  
Chen B, Xu X D, Bian J C, Shi X H. Irreversible stratosphere-troposphere mass exchange characteristics over the Asian summer monsoon region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(5): 1050-1059.
- [16] Randel W J, Park M, Emmons L, et al. Asian monsoon transport of pollution to the stratosphere. *Science*, 2010, 328(5978): 611-613. doi: 10.1126/science.1182274.
- [17] Bannister R N, O'Neill A, Gregory A R, et al. The role of the S. E. Asian Monsoon and other seasonal features in creating the 'tape-recorder' signal in the unified model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 2003, 130(559): 1531-1554, doi: 10.1256/qj.03.106.
- [18] Park M, Randel W J, Gettelman A, et al. Transport above the Asian summer monsoon anticyclone inferred from Aura Microwave Limb Sounder tracers. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112, D16309, doi: 10.1029/2006JD008294.
- [19] James R, Bonazzola M, Legras B, et al. Water vapor transport and dehydration above convective outflow during Asian monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, 2008, 35, L20810, doi: 10.1029/2008GL035441.
- [20] Fu R, Hu Y L, Wright J S, et al. Short circuit of water vapor and polluted air to the global stratosphere by convective transport over the Tibetan Plateau. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2006, 103(15): 5664-5669.
- [21] 陈斌, 徐祥德, 施晓晖. 2005年夏季亚洲季风区下平流层水汽的对流源区. *自然科学进展*, 2009, 19(10): 1094-1099.  
Chen B, Xu X D, Shi X H. The dominant sources of water vapor in the low stratosphere over Asian monsoon region during the boreal summer in 2005. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 2009, 19(10): 1094-1099.



- [22] Stohl A, Forster C, Frank A, et al. Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 2005, 5(4): 2461-2474.
- [23] 陈斌, 徐祥德, 卞建春等. 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. *大气科学*, 2010, 34(3): 495-505.  
Chen B, Xu X D, Bian J C, et al. Sources, pathways and timescales for the troposphere to stratosphere transport over Asian monsoon regions in boreal summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2010, 34(3): 495-505.
- [24] Berthet G, Esler J G, Haynes P H. A Lagrangian perspective of the tropopause and the ventilation of the lowermost stratosphere. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112, D18102, doi: 10.1029/2006JD008295.
- [25] Levine J G, Braesicke P, Harris N R P, et al. Pathways and timescales for troposphere-to-stratosphere transport via the tropical tropopause layer and their relevance for very short lived substances. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112, D04308, doi: 10.1029/2005JD006940.
- [26] Randel W J, Wu F, Oltmans S J, et al. Interannual changes of stratospheric water vapor and correlations with tropical tropopause temperatures. *J. Atmos. Sci.*, 2004, 61(17): 2133-2148.
- [27] Berthet G, Esler J G, Haynes P H. A Lagrangian perspective of the tropopause and the ventilation of the lowermost stratosphere. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112, D18102, doi: 10.1029/2006JD008295.
- [28] 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 R J, Chen Y J. Ozone variations over the Tibetan and Iranian plateaus and their relationship with the South Asia high. *Journal of University of Science and Technology of China* (in Chinese), 2005, 35(6): 899-908.
- [29] Dessler A E, Sherwood S C. Effect of convection on the summertime extratropical lower stratosphere. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109, D23301, doi: 10.1029/2004JD005209. (本条文献与第9条重复)
- [30] Plumb R A. A "tropical pipe" model of stratospheric transport. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101(D2): 3957-3972.
- [31] Liu C T, Zipser E J. Global distribution of convection penetrating the tropical tropopause. *J. Geophys. Res.*, 2005, 110, D23104, doi: 10.1029/2005JD006063.
- [32] Folkins I, Fueglistaler S, Lesins G, et al. A low-level circulation in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 2008, 65(3): 1019-1034.

(本文编辑 汪海英)