0577-6619/2011/69(3)-0464-71 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

南亚高压对亚洲季风区夏季对流层上层水汽异常分布的动力效应*

陈 斌 徐祥德 施晓晖
CHEN Bin XU Xiangde SHI Xiaohui

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室，北京，100081
State Key Laboratory of Severe Weather (*LaSW*), *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081, *China*
2009-04-23 收稿，2009-06-05 改回.

Chen Bin, Xu Xiangde, Shi Xiaohui. 2011. A study of the dynamic effect of the South Asian high on the upper troposphere water vapor abnormal distribution over the Asian monsoon region in boreal summer. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(3): 464-471

Abstract Proper recognition of the water vapor distribution and formation mechanism in the upper troposphere (UT) over the Asian monsoon region is of great significance for understanding of global climate change. Based on the latest Earth Observing System Microwave Limb Sounder (EOS-MLS) satellite retrievals product, the study firstly presented a qualitative analysis of the anomaly characteristics of the upper troposphere water vapor distribution. Then we studied the air particles horizontal transport characters in the upper troposphere layer over the Tibetan Plateau and its adjoint areas using the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) reanalysis data of 2005 and a particle dispersion model FLEXPART. Also the dynamical effects of the south Asian high, which are able to trap the constituents in its core, in determining and maintaining the water vapor distribution are investigated quantitatively.

The analysis of the EOS-MLS satellite retrieval products shows that the Asian monsoon region is an area of particular interest, as it is characterized by a persistent maximum of water vapor in the upper troposphere. The location of maximum water vapor on 215 hPa coincides with the deep convection. However, the water vapor maximum at 147 hPa does not spatially correspond to the maximum of convective activity, but is located inside the South Asian high. The distribution of carbon monoxide over this area shows the same characteristic as the water vapor. This result suggests an important role of the South Asian high in determining and maintaining the water vapor distribution. For every numerical simulation, 10000 forward parcels trajectories were calculated for the summer of 2005. The result of idealized ensemble numerical simulations (total 66 groups) indicates that the South Asian high circulation acts as a horizontal transport barrier in the upper troposphere and low stratosphere during the boreal summer. The effects of the South Asian high are mostly in the height between 12 km and 15 km vertically. While in horizontal direction, the close circumfluence of the South Asian high enables air particles to stay inside the anticyclone for more than one month. This might be one of the explanations of the zonal anomaly distribution characteristics of vapor over the Asian summer monsoon region.

Key words South Asian high, Upper troposphere, Vapor anomaly distribution, Dynamic effect

摘 要 正确认识对流层上层水汽以及其他大气痕量成分的分布和形成机理对于正确认识全球气候变化具有重要的意义。已有的研究说明亚洲季风区为全球的一个特殊的区域。基于最新的卫星微波临边探测仪(EOS-MLS)资料，首先定性地分析了亚洲季风区对流层上层水汽分布异常特征，然后，利用2005年夏季NCEP/NCAR的GFS资料和大气拉格朗日输送-扩散

* 资助课题：国家科技部国际合作项目(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(2008Z006)、灾害天气国家重点实验室自主研究项目(2008LASWZI04、2009LASWZF02)。
作者简介 陈斌，主要从事大气环境变化与气候效应研究。E-mail：chenbin@cams.cma.gov.cn

模式(FLEXPART),采用空气粒子群前向轨迹模拟方法,对夏季南亚高压在夏季对流层上层物质输送和大气成分水平异常分布中的动力作用和影响特征进行了定量研究。

对卫星反演数据资料分析显示,亚洲季风区对流层上层存在水汽分布的大值异常区,在 215 hPa 高度,水汽分布异常中心和深对流位置相吻合,在 147 hPa 高度,水汽异常大值位置不再和深对流中心相吻合,而是位于南亚高压反气旋内部。一氧化碳等其他大气痕量成分亦有类似分布特征,这说明南亚高压闭合反气旋可能对水汽等其他大气痕量成分产生影响。集合数值模拟试验结果表明,垂直方向上,南亚反气旋闭合环流对大气痕量成分异常分布的动力效应主要表现在 12—15 km 高度,而水平方向上,反气旋闭合环流可以使得内部空气粒子滞留时间超过一个月,因此,南亚高压的输送屏障作用所产生的动力效应是亚洲季风区对流层上层的水汽大值中心存在并得以维持异常分布的一个重要原因。

关键词　南亚高压,对流层上层,水汽异常分布,动力效应

中图法分类号　P434

1　引　言

亚洲季风区夏季大气环流与下部持续深对流相耦合(Hoskins, et al, 1995; Highwood, et al, 1998),以及大尺度海陆分布和青藏高原大地形造成的动力、热力影响(徐祥德等,2001;吴国雄等,2004),使对流层上层的南亚高压反气旋可以向上扩展到平流层下层。在此特殊的闭合环流形势影响下,夏季南亚高压控制区域的对流层上层—平流层下层高度(约 8—20 km)大气成分分布及其变化具有独特的区域特征。20 世纪 90 年代,周秀骥等(1995)的研究发现,和同纬度地区相比,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;Randel, et al,2007; Zhang, et al, 2009)。最近的观测资料研究进一步表明,南亚高压反气旋控制区内对流层上层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区域,如水汽、一氧化碳等的极大值中心(Lelieveld, et al, 2002; Dessler,et al,2004;Li,et al,2005; Fu,et al, 2006; Park,et al,2007)。

对流层上层中的水汽和一氧化碳主要来源于大气边界层的抬升和输送过程。然而,夏季对流层上层南亚高压南侧为向西的东风急流,北侧为向东的高空西风急流,从对流层输送到高层的大气痕量成分本应该在急流作用下很快被稀释扩散,但为什么在南亚高压及其周边区域的异常分布特征能够在整个夏季维持呢?许多学者推测,除了垂直方向上中小尺度对流的抬升作用和对流层上层区域大尺度输送过程影响以外,水平方向上南亚高压闭合反气旋环流的输送屏障作用所产生的动力效应亦是使南亚高压内对流层上层大气痕量成分分布成为一个相对极值中心的主要原因之一(Fu,et al,2006; Park, et al, 2007)。最近,基于卫星反演产品的分析得到了一些初步成果,有中国学者分析表明青藏高原及其周边区域臭氧浓度偏低主要出现在 12—25 km 高度(周任君,2005)。Park(2008)对 2004—2006 年夏季外场试验观测廓线数据进行分析,表明南亚反气旋内水汽在 12—20 km 高度存在异常,13—15 km 为极大值,而臭氧等平流层痕量气体在 12—20 km 高度的反气旋内部减小。

对于夏季南亚高压反气旋对对流层上层大气痕量成分动力控制的影响大小如何?这种动力效应主要影响的高度是多少?过去研究多是基于资料的旁证和推测,有必要从定量角度做进一步研究。这些问题的正确回答,对于正确认识亚洲对流层上层水汽以及其他大气痕量成分的分布和形成机理,准确评价源于边界层抬升的大气污染物光化学反应过程对对流层上层臭氧的损耗都具有重要意义。由于观测资料精度及时空分辨率的限制,还不能得到更为详尽的结论。

因此,本文在已有研究的基础上,首先借助基于拉格朗日方法求解方案的大气模式(FLEXPART),通过集合数值模拟方法,对夏季东亚季风/青藏高原地区的高层反气旋对大气成分物质分布的屏障作用进行系统性研究,以期进一步揭示出夏季南亚高压对该区域对流层上层大气成分水平异常分布的动力作用和影响的定量特征。

2　资料和模式

2.1　EOS-MLS 卫星资料

美国宇航局(NASA)2004 年 7 月 15 日发射了 Aura 卫星,该卫星携带的微波临边探测仪(EOS-MLS)可探测全球对流层上层大气成分(如一氧化

碳(CO):215—0.0046 hPa;水汽(H_2O):316—0.002 hPa;臭氧(O_3):215—0.022 hPa)、温度、湿度以及云冰含量等与气候变化相关的大气要素,对于温度和重力位势高度及其大气痕量气体的观测有效等压面高度在316—0.001 hPa,大约12—94 km。最近,基于MLS卫星观测数据的研究已经广泛展开(Filipiak, 2005;Li,2005; Fu, et al,2006;Jiang, 2007)。许多工作对MLS大气成分反演资料的可靠性进行了验证,对水汽而言,在215、147和100 hPa高度,其体积比浓度的典型单廓线偏差分别为0.9×10^{-6}、0.7×10^{-6}和0.5×10^{-6}(Livesey, et al,2005)。研究表明,在平流层和对流层上层CO和实测结果较为一致,误差范围在20×10^{-9}以内(Livesey,et al,2007)。本文使用的水汽体积混合比资料为1.5版的MLS二级标准产品,时间为2005、2006年夏季(6—8月)逐日平均资料。沿着轨道MLS观测的水平分辨率约为3个经度,为分析方便,将逐日资料通过Kriging插值为5°×5°经纬度分辨率。

2.2 模式说明

为了研究南亚高压反气旋环流对夏季亚洲季风区对流层上层水汽和其他大气痕量成分的动力效应,采用拉格朗日轨迹模式FLEXPART。该模式不同于通常计算单点的轨迹模式,而是通过计算空气粒子(小空气块)的运动轨迹,进而实现对大气物质的输送和扩散过程的模拟(Stohl, et al, 1998; Stohl,et al,2005)。拉格朗日粒子模式计算大量的气块轨迹去描述空气的输送和扩散过程。作为新一代的拉格朗日模式,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-扩散过程,而后向模拟可以确定排放源的影响区域。与化学模式相比,虽然该模式中没有考虑大气的化学过程,但是拉格朗日粒子模式优于欧拉模式主要是积分过程中空间分辨率不受数值离散的影响,同时保持了较高的计算精度。

FLEXPART模式被广泛应用于许多方面的研究,包括核事件后放射性物质的输送、温室气体循环、对流层-平流层交换及其水循环等。如大气污染输送、森林火灾污染的中尺度输送过程研究、甚至气候学时间尺度上的全球污染物的输送研究(Stohl, et al,2005),近年来被用于对流层-平流层交换的研究(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再分析资料等提供。需要特别指出的是,该拉格朗日模式和其他轨迹模式相比,在求解过程中亦考虑了湍流效应,同时,为了考虑对流效应,FLEXPART模式中也采用了对流参数化方案(Forster,et al,2007),使模式误差进一步减少。

3 南亚高压内水汽及CO的异常分布特征

3.1 水汽异常分布特征

绘制2005和2006年夏季(6月1日到8月31日)215、147和100 hPa 3个气压高度层上EOS-MLS观测的水汽体积混合比平均分布和相应高度层上的NCEP再分析资料的水平方向风矢量(图1),这里使用的风场资料为2005和2006年(6—8月)的NCEP/NCAR每日4次(00、06、12、18时,世界时)的全球预报系统(GFS)模式分析资料,数据水平分辨率为1°×1°,垂直方向26层。从图1可以看出,在对流层上层215和147 hPa,南亚反气旋/青藏高原及其周边区域存在水汽的异常大值区。比较215和147 hPa高度的水汽体积混合比,215 hPa高度水汽的异常大值区和射出长波辐射表征的深对流区域大致相吻合。在147 hPa高度上,南亚反气旋位于深对流的西北方向,这符合热源驱动的"Gill型"环流情况(Gill,1980),水汽异常大值区分布亦存在以(20°N,90°E)为中心的一个极大值异常区,位于深对流的西北方向,和南亚反气旋的闭合环流较为一致。

由于南亚高压南侧的副热带急流和北侧的西风急流的存在,在对流层上层具有较大的风速,水平方向上大气输送本来应该是一个快速的过程。而南亚高压反气旋屏障的存在,使反气旋内部的大气物质在输送过程中,由于大尺度环流的影响,不容易"逃逸"出该闭合的流场。因此,初步分析可以认为,不同高度层次上控制这种异常分布的机制不同,在215 hPa异常大值区主要受到深对流的影响,而在147 hPa南亚反气旋的闭合环流位置决定了异常区的地理分布。这说明,在对流层上层,随着高度的增加深对流的热力作用对水汽异常分布作用逐渐减弱,而南亚反气旋闭合环流的动力控制作用逐渐增加。

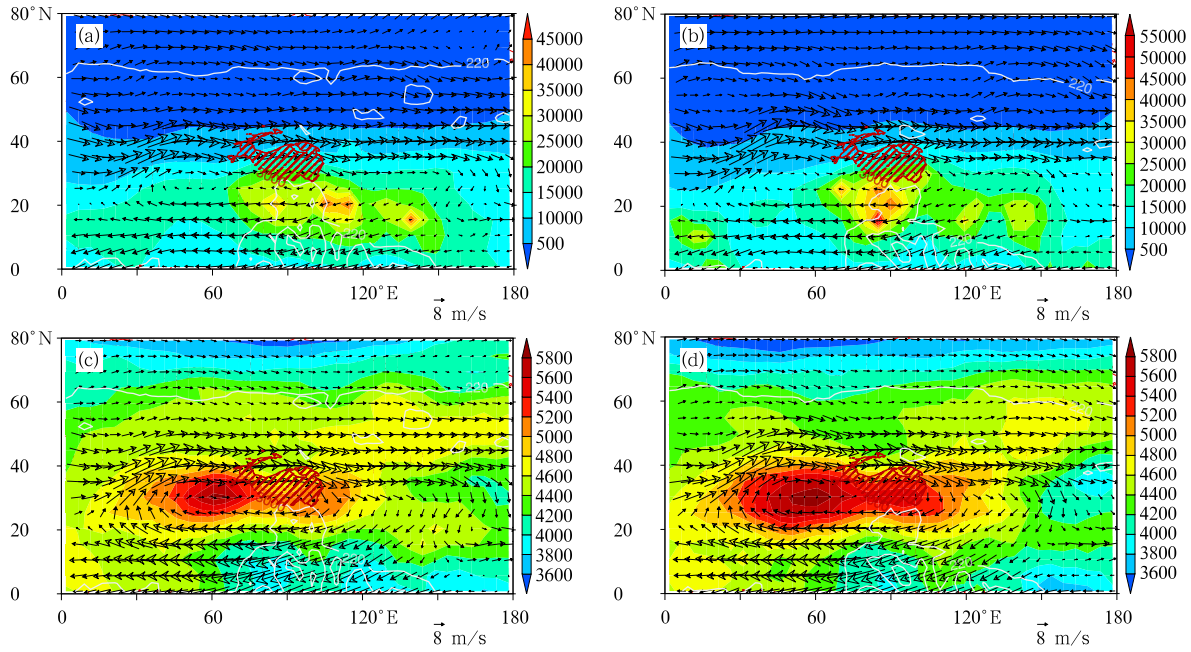


图 1　2005 (a、c) 和 2006 年 (b、d) 夏季(6 月 1 日—8 月 31 日)215 hPa (a、b)、147 hPa (c、d) 两个气压高度层上亚洲区水汽体积混合比浓度(单位:10^{-9})平均分布和相应高度层上的 NCEP 再分析风矢量(m/s)

(白色实线表示小于 220 W/m^2 的射出长波辐射等值线,红色的斜线阴影区表示地形高于 3 km 的青藏高原地区)

Fig. 1　Climatological means of the water vapor mixing ratio (shaded, unit: 10^{-9}) and horizontal wind fields unit: m/s) at 215 hPa (a, b) and 147 hPa (c, d) for the summers (June－August) 2005 (a, c) and 2006 (b, d)

(The Tibetan Plateau is shown with the oblique line shading for the elevation is >3 km. The white solid line is for the isoline of the outgoing longwave radiation (OLR) being 220 W/m^2)

3.2　CO 异常分布特征

MLS 产品中大气痕量成分有多种,其中 CO 作为主要来源于近地层污染源排放,且具有较长的光化学生命周期,可以作为一种大气物质输送过程的示踪物,在此继续考察 CO 的平均分布状况。比较 2005 和 2006 年夏季(6 月 1 日到 8 月 31 日)215、147 hPa 高度层上 MLS 观测的 CO 体积混合比浓度平均分布和相应高度层上的 NCEP 再分析资料的水平方向风矢量(图 2)可以看出,就两年的夏季平均状况而言,CO 浓度分布极为相似,说明年际变化不大。在两个不同高度层次上,青藏高原及其周边区域都存在 CO 浓度分布的异常大值区,在 215 hPa 上,夏季平均的 CO 浓度分布存在以(20°N,90°E)为中心的一个极大值异常区,该极大值中心和射出长波辐射表征的深对流区域大致相吻合。同时也可以看到,在(0°—30°N,0°—110°E)甚至更大范围的区域,存在一个 CO 浓度的纬向异常区域,此大的异常区和该高度层上的风矢量表示的闭合环流较为一致。和水汽分布类似,在 215 hPa 高度上深对流对 CO 的分布具有较大影响,但是大范围的 CO 浓度分布还受到南亚高压反气旋的控制作用。而在 147 hPa 上,大范围的 CO 异常分布和南亚反气旋闭合环流位置更为一致。但是值得注意的是,异常分布区的极大值中心和南亚高压闭合环流并不完全吻合,其分布依然受到南亚高压和对流活动的共同影响。

总之,亚洲季风区对流层上层存在一个水汽和 CO 的异常分布,可以看到在夏季对流层上层大气痕量成分分布可能主要受到深对流的垂直输送影响,而随着高度的增加,异常中心和对流最强中心位置不再吻合,异常区域重要表现在南亚反气旋内部,说明南亚高压闭合反气旋环流水平方向的输送屏障作用所产生的动力效应,可能是该区域水汽大值中心存在并得以维持的重要原因之一。

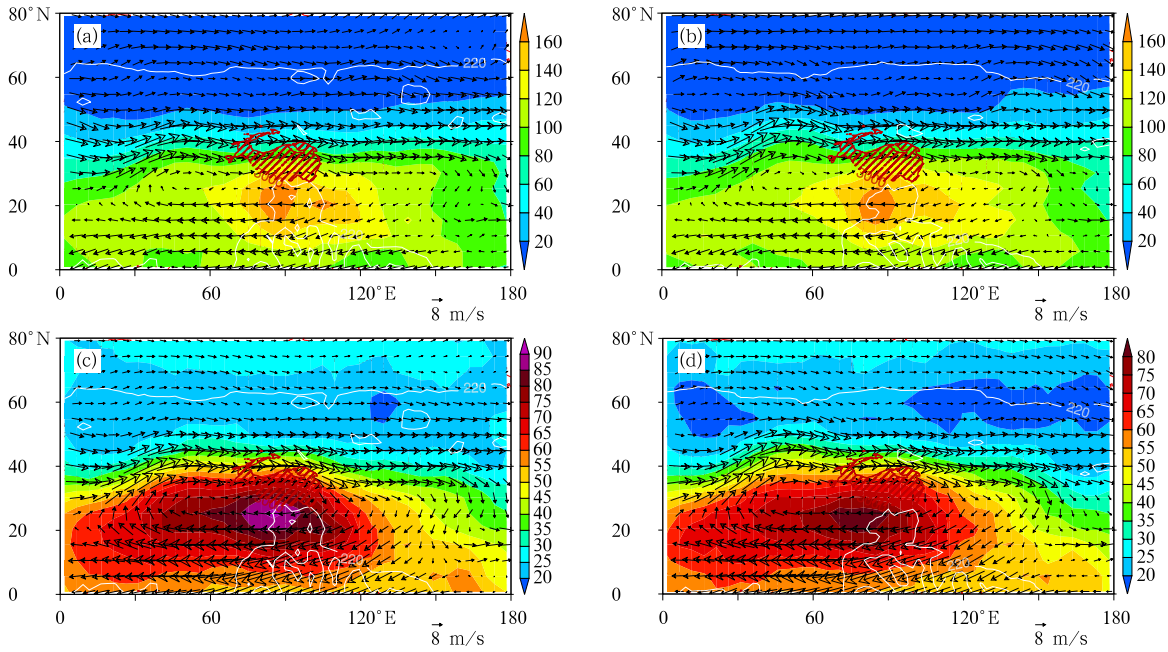


图 2 同图 1,但为 CO 分布

Fig. 2 As in Fig 1 but for the carbon monoxide distribution

4 南亚高压的动力影响效应

4.1 表征南亚高压动力效应的指标

这里主要考察南亚高压闭合反气旋环流水平方向的输送屏障作用所产生的动力效应的定量特征,即在大气环流驱动作用下,随着时间的推移,反气旋内部的一部分大气“逃出”反气旋控制的难易程度。结合 FLEXPART 模式的特点,这里采用前向轨迹的模拟,根据 FLEXPART 模拟结果,可以把滞留在反气旋内部的空气粒子数目(N_{part})和初始化空气粒子总数(T_{part})的百分比随时间的变化作为反气旋的水平输送屏障作用的定量指标,即 $F_{\text{frac}}=\dfrac{N_{\text{part}}}{T_{\text{part}}}$。为方便起见,选用 2005 和 2006 年 7 月 1 日—8 月 31 日 150 hPa 高度层上 14320 gpm 等值线(图 3)作为亚洲夏季反气旋的边界,虽然这个边界的选取具有任意性,但是显而易见,计算结果应该对位势高度选取范围的大小敏感性不是很强。显然,如果反气旋的屏障作用较强时,F_{frac}将比较大,反之,亦然。

4.2 试验方案设置

基于 NCEP/NCAR 再分析的风场资料,设定模拟试验,计算特定时间的三维拉格朗日粒子扩散模式的排放源(空气粒子初始化位置),根据对粒子的集合输送轨迹计算结果,可以对南亚高压反气旋输送屏障作用进行考察。但是为系统了解该作用夏季气候学特征,减少计算误差所带来的不确定性,采用集合模拟试验的思路,对不同高度和不同时间的多种情况进行模拟,以对模拟试验结果进行综合分析。

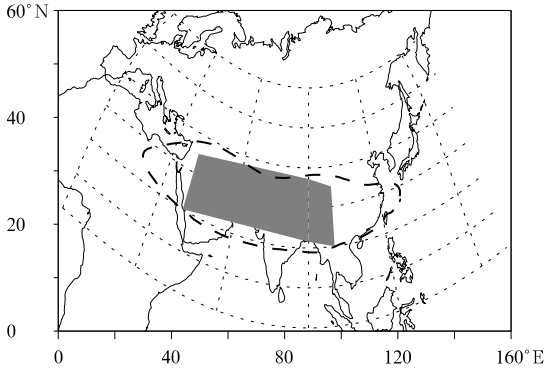


图 3 150 hPa 高度层上 14320 gpm 等值线(虚线)及其模式初始排放粒子分布(阴影区)

Fig. 3 Map of the particles on the 150 hPa initialized level on June 1, 2005 (shaded). Long dashed lines indicate the July－August averaged 14320 gpm at 150 hPa, which we use as a simplified boundary for the monsoon anticyclone

模式积分开始时,初始化粒子群中个数为 10000 个,空气粒子释放水平区域为图 3 中的阴影区域所示。为了研究反气旋屏障主要影响的高度,选取空气粒子初始化位置的高度范围为 5—33 km(33、25、20、18、16、14、12、10、9、7、5 km,共 11 层)。选取模式积分开始时间分别为 2005 年 7 月 2、7、12、17、22、27 日的 00 时(共 6 组),积分时间为28 d。这样共有 66 组数值模拟试验。

模式输入的风、压、温、湿等气象驱动场采用

2005—2006 年和 2006—2007 年夏季 6—8 月 NCEP 全球预报系统(GFS)再分析资料。其水平分辨率 1°×1°,时间分辨率每日 4 次的逐日资料(00、06、12、18 时),数据垂直方向为 26 层。

4.3　结果分析

首先,从模拟结果中挑选不同高度上的个例,可以直观分析南亚高压反气旋对对流层上层大气成分异常分布影响。如选取可以代表对流层上层上、中、下 3 个部分的 18、14 和 9 km 3 个高度层上 2005 年 7 月 21—30 日高度的大气"粒子"输送和扩散过程模拟(图略),明显可以看到,在不同高度上大气输送都呈现顺时针方向,表明南亚高压反气旋对物质输送的路径具有重要的控制作用。但是同时也可以看到,不同高度上南亚反气旋的控制作用不同。14 km 高度上南亚高压反气旋的影响比较而言要更为强烈,而在 9 km(低层)和 18 km(高层),反气旋对该高度层上物质输送和扩散过程的影响程度都要小。

进一步的定量分析分别给出了 5、7、9、10、12、14、16、18、20 km 高度不同时间释放粒子依据逐日演化过程计算的 F_{frac} 随时间变化情况(图 4)。以

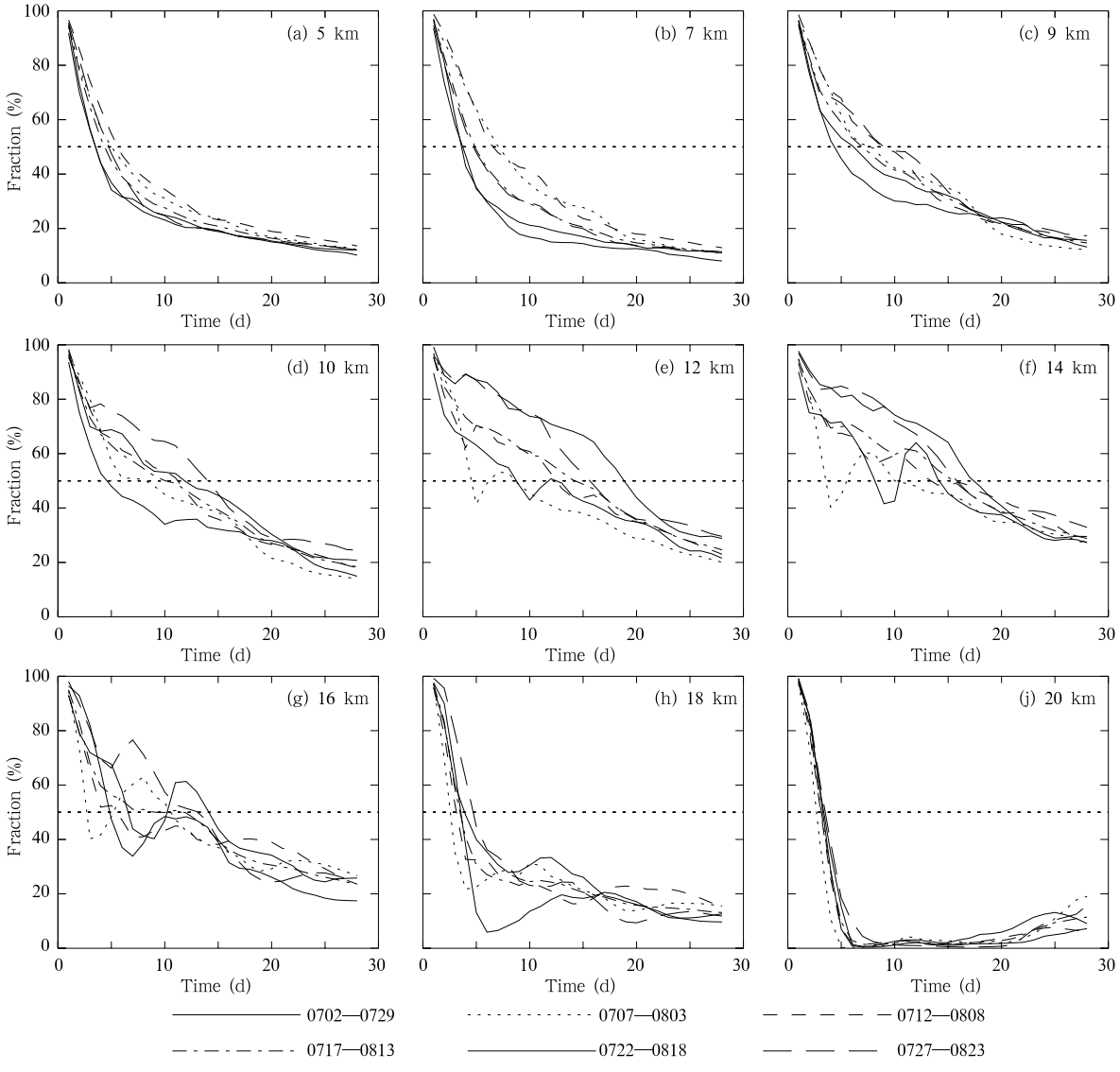


图 4　不同粒子释放高度(5、7、9、10、12、14、16、18、20 km)和释放时间情景下,反气旋内部的粒子百分比 F_{frac} 随时间的变化

Fig. 4　Temporal changes in the fraction of particles inside the anticyclone from 66 trajectory simulations for July－August 2005 (see the text for further details) with the particles released at (a) 5 km, (b) 7 km, (c) 9 km, (d) 10 km, (e) 12 km, (f) 14 km, (g) 16 km, (h) 18 km and (i) 20 km

F_{frac}衰减至50%为标准,可以发现,在对流层大气物质可以很快被输送到反气旋外部,一般5天左右;而12—14 km高度上,即所谓的对流层上层,由于受到反气旋的隔离作用,对于该高度层需要15天左右,最长时间甚至需要20天,如12 km高度上2005年7月22日释放的空气粒子,10天以后近70%的粒子滞留在反气旋内部,20天以后近50%仍然滞留。随着高度增加,反气旋的隔离作用减弱,16 km高度小于10天,甚至18 km高度上,南亚高压反气旋的"隔离"作用可以忽略不计,经过3—4天的输送F_{frac}的值约为40%。

另外,值得注意的是,对于不同的粒子模拟开始日期,14 km高度以下或者16 km高度以上F_{frac}的时间演变曲线比较吻合,结果相差并不是很大,表明这一结果对具体的初始条件并不敏感。而对14—16 km高度不同排放源模拟的F_{frac}时间演变曲线具有较大振幅,这也说明垂直输送过程可能对数值模拟计算结果产生了重要影响,也从另一个方面表明在14—16 km区域是夏季对流层-平流层交换的主要发生高度。

为考察整体情况,把不同模拟时间段的所有模拟结果进行平均。综合所有模拟结果,给出以上66个模拟试验平均得到的F_{frac}随着高度和时间变化的分布情况(图5)。由图5可见,在16 km左右是反气旋所能达到的最高高度,在此高度以上,由于高空急流的存在,使物质输送很快就远离数值模拟初始大气粒子释放位置。最大反气旋的动力屏障作用在对流层上层,特别是在约13—15 km(200—100 hPa)高度。值得指出的是,这个结果和该季风区强的反气旋环流风场结构相吻合,同样,这些输送计算结果和该区域对流层上层季风区夏季水汽和臭氧的结构也是一致的(Park,2008)。

从图5中也可以看出,反气旋对物质输送的动力控制作用是相当大的,在18 km高度,源于反气旋内部的大气物质要输送到其外部,往往1—2天就可以输送出粒子数目的50%,而在反气旋作用较为强烈的14 km,却常常需要15天左右的时间。反气旋对物质输送的动力控制可以使大气污染物在反气旋内部滞留1个月左右,因此可以认为,亚洲季风对流层上层大气痕量气体成分分布的异常特征和这种动力控制作用息息相关。

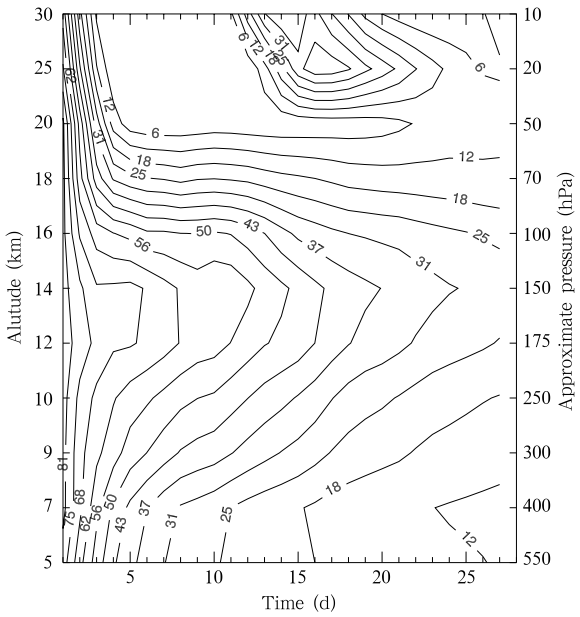


图5 集合模拟结果得到的反气旋内部粒子百分比随着粒子释放高度和时间变化的分布

Fig. 5 Fractions of particles inside the anticyclone as a function of the pressure height and time, derived from the ensemble of the transport calculations (as in Fig. 4 for the others)

5 结论和讨论

卫星资料分析表明,亚洲季风区夏季对流层上层—平流层下层存在水汽分布的异常区域。在215 hPa异常大值区主要和夏季深对流活动有关,而在147 hPa南亚反气旋的闭合环流位置决定了异常区的地理分布。这说明,在对流层上层,随着高度的增加深对流的热力作用对水汽异常分布作用逐渐减弱,而南亚反气旋闭合环流的动力控制作用逐渐增强。

同时,基于NCEP的GFS全球再分析资料,利用拉格朗日大气输送-扩散模式,对不同高度上释放在反气旋内具有同样位置的粒子群,追踪其前向轨迹,通过66组理想的数值模拟试验对南亚高压闭合反气旋环流水平方向的输送屏障作用所产生的动力效应进行了初步定量探讨。数值模拟结果表明,不同高度空气水平方向上输送和扩散的速率不同。在16 km高度以上,由于高空急流的存在,使水平方向上的空气粒子输送很快就远离大气粒子释放的初始位置。同样,在10 km以下,空气粒子也具有较快的输送和扩散速率,空气粒子亦可以很快就"逃逸"

出反气旋内部,10—16 km 高度可以和南亚高压的主体相当。而南亚高压反气旋影响的最大高度是12—15 km,该高度层上南亚反气旋的动力控制作用可能会使源于对流层的大气污染物在反气旋内部滞留时间超过一个月。这对于认识青藏高原及其周边区域水汽等异常分布及其他大气痕量成分异常分布的形成都具有一定的借鉴意义。

需要指出的是,本文的研究只是基于数值模拟的结果,拉格朗日模式误差的大小很大程度上取决于输入的气象场资料的可靠性,利用不同的观测资料做进一步的分析验证是很有必要的。

致谢:挪威大气研究所的 Andreas Stohl 教授提供了 FLEXPART 模式,并对模式实际应用过程中的一些问题给予了详尽的耐心解释;中国科学院大气物理研究所卞建春研究员为本文提供了宝贵的修改意见;美国宇航局喷气推进实验室提供了 EOS-MLS 卫星反演产品资料,在此一并表示感谢。

参考文献

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//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

吴国雄, 毛江玉,段安民等. 2004. 青藏高原影响亚洲夏季气候研究的最新进展. 气象学报, 62(5):528-539

徐祥德, 周明煜, 陈家宜等. 2001. 青藏高原地-气过程动力、热力结构综合物理图象. 中国科学 D 辑: 地球科学, 31(5): 428-440

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. 中国科学技术大学学报, 35(6):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. 科学通报, 40(15):1396-1398

Dessler A E, Sherwood S C. 2004. The effect of convection on the summertime extratropical lower stratosphere. J Geophys Res, 109, D23301, doi:10.1029/2004JD005209

Filipiak M J, Harwood R S, Jiang J H, et al. 2005. Carbon monoxide measured by the EOS Microwave Limb Sounder on Aura: First results. Geophys Res Lett, 32: L14825, doi: 10.1029/2005GL022765

Forster C, Stohl A, Seibert P. 2007. Parameterization of convective transport in a Lagrangian particle dispersion model and its evaluation. J Appl Meteor Climatol, 46: 403-422

Fu R, Hu Y, Wright J S, et al. 2006. Shortcircuit of water vapor and polluted air to the global stratosphere byconvective transport over the Tibetan Plateau. Proc Natl Acad Sci, 103:5664-5669

Gettelman A, Kinnison D E, Dunkerton T J, et al. 2004. Impact of monsoon circulations on the upper troposphere and lower stratosphere. J Geophys Res, 109: D22101, doi: 10.1029/2004JD004878

Gill A E. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. Quart J Roy Meteor Soc, 106:447-462

Highwood E J, Hoskins B J. 1998. The tropical tropopause. Quart J Roy Meteor Soc, 124:1579-1604

Hoskins B J, Rodwell M J. 1995. A model of the Asian summer monsoon. Part I: The global scale. J Atmos Sci, 52(9):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 Geophys Res, 108(D12):8519, doi:10.1029/2002JD002637

Jiang J H, Livesey N J, Su H, et al. 2007. Connecting surface emissions, convective uplifting and long-range transport of carbon monoxide in the upper troposphere: New observations from the Aura Microwave Limb Sounder. Geophys Res Lett, 34: L18812, doi:10.1029/2007GL030638

Lelieveld J, Berresheim H, Borrmann S, et al. 2002. Global air pollution crossroads over the Mediterranean. Science, 298:794-799

Li Q L, Jiang J H, Wu D L, et al. 2005. Convective outflow of South Asian pollution: A global CTM simulation compared with EOS MLS observations. Geophys Res Lett, 32: L14826, doi: 10.1029/2005GL022762

Livesey N J, M J Filipiak, L Froidevauk, et al. 2007. Validation of Aura microwave limb sounder O_3 and CO observations in the upper troposphere and lower stratosphere. J Geophys Res, doi: 10.1029/2007JD008805

Park M, Randel W J, Emmons L K. 2008. Chemical isolation in the Asian monsoon anticyclone observed in Atmospheric Chemistry Experiment (ACE-FTS) data. Atmos Chem Phys, 7: 13839-13860

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 Geophys Res, 112: D16309, doi:10.1029/2006JD008294

Randel W J, Park M. 2007. Deep convective influence on the Asian summer monsoon anticyclone and associated tracer variability observed with Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). J Geophys Res, 111: D12314, doi:10.1029/2005JD006490

Stohl A, Forster C, Frank A, et al. 2005. Technical Note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. Atmos Chem Phys, 5:2461-2474

Stohl A, Hittenberger M, Wotawa G. 1998. Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large scale tracer experiment data. Atmos Environ, 32: 4245-4264

Zhang Renhe, Zhou Shunwu. 2009. Air temperature changes over the Tibetan Plateau and other regions in the same latitudes and the role of ozone depletion. Acta Meteor Sinica, 23(3): 290-299