第16卷第3期	气 候 与 环 境 研 究	Vol. 16	No. 3
2011 年 5 月	Climatic and Environmental Research	May	2011

陈斌,徐祥德,施晓晖. 2011. 亚洲季风区夏季近地层 CO 向上对流层输送过程的模拟 [J]. 气候与环境研究, 16 (3): 280-288. Chen Bin, Xu Xiangde, Shi Xiaohui. 2011. Simulation on the transport processes of CO from surface layer to upper troposphere in summer over Asian monsoon region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (3): 280-288.

亚洲季风区夏季近地层 CO 向上对流层输送过程的模拟

陈斌1,2 徐祥德1 施晓晖1

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

摘 要 基于全球大气研究排放源(Emission Database for Global Atmospheric Research, EDGAR, 3.2版 本)的CO地表排放源数据,借助于拉格朗日大气轨迹输送模式FLEXPART,通过数值模拟手段,初步探讨 了 2006 年夏季亚洲季风区 CO 异常分布形成的原因及深对流向上输送和反气旋控制作用相关的输送过程。比 较分析发现,受到地表排放源等不确定因素的影响,数值模拟和卫星资料反演的 CO 浓度存在一定偏差(体积 分数相差可达 2×10⁻⁸~3×10⁻⁸),但其时空变化特征具有相对的一致性。仅在大尺度风场的驱动下,模式亦 可以模拟出上对流层区域 CO浓度分布特征,但进一步考虑对流抬升的输送作用后,模拟结果和实际资料更吻 合,表明亚洲季风区上对流层区域 CO浓度大值区的形成是中小尺度对流抬升和大尺度输送的共同作用,但后 者影响程度更大。亚洲季风区夏季上对流层区域的 CO 主要源于印度半岛北部、非洲中部和中国东北部地区的 地表排放。该区域 CO 异常分布主要和两个输送过程相关:一个是大尺度输送和中小尺度对流抬升在垂直方向 的输送,使得对流层下部的高 CO 浓度大气可以很快地抬升到上对流层,甚至可以达到 16 km 的对流层顶高度 附近,然后在哈得来环流以及南亚反气旋的影响下,进一步向低纬热带地区输送,另一个是对流层中低层向东 和向极一侧的输送使得印度中南部、阿拉伯半岛甚至非洲中部成为亚洲季风区内CO远距离输送的源区。 关键词 亚洲季风区 上对流层 CO 拉格朗日输送模式

文章编号 1006 - 9585 (2011) 03 - 0280 - 09 中图分类号 P421.32 文献标识码 A

Simulation on the Transport Processes of CO from Surface Layer to Upper Troposphere in Summer over Asian Monsoon Region

CHEN Bin^{1,2}, XU Xiangde¹, and SHI Xiaohui¹

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

Abstract Based on the annual Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR, Version 3. 2) CO emissions data, the preliminary mechanism of the extreme center coming into being and related transport process transported upwards by deep convection and confined by the anticyclonic circulation in the North Hemisphere in summer 2006 is investigated by using a Lagrangian particle transport and dispersion model FLEXPART containing a simple convective parameterization. There is a good agreement in the temporal trend although a litter difference (the

收稿日期 2009-07-24 收到, 2011-01-04 收到修定稿

资助项目 科技部国际合作项目 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,公益性行业专项 科研基金 GYHY201006009、GYHY201006053

作者简介 陈斌,男,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

volume fraction can reach 2×10^{-8} - 3×10^{-8}) between simulated CO and observations derived from satellite is obtained over Asia monsoon region possibly due to the uncertainty of CO emissions. The authors investigate the respective roles of large scale transport and convection in determining CO maximum in Upper Troposphere (UT) in the Asian monsoon region. It is found that the model can also simulate the CO distribution characteristic even only droved by the large scale wind fields. But the enhanced results can be obtained with the consideration of convection. The results show that convection does not have a significant impact on the CO budget comparing with the large scale circulation. The maximum CO value regions in UT in the Asian monsoon areas in summer mainly have an origination from the atmosphere boundary layer surface from the north of Indian Peninsula, the middle of Africa, and the northeast part of China, In Asian monsoon regions, two main transportation processes of CO account for the exceptional distribution of CO in upper troposphere. On the one hand, high density CO in the lower troposphere can be lifted upwards into UT quickly, even can be advected vertically further to the altitudes near the tropopause (about 16 km) by large scale, and mesoscale and small scale convective circulation, and then, much of the CO is then advected in the upper troposphere southwestward with the cross equatorial Hadley flow. On the other hand, the eastward and poleward transportations in the middle and lower troposphere turn the central southern India, Arabia, even the middle part of Africa into origins for long distance transport of CO in the Asian monsoon regions. Key words Asian monsoon region, upper troposphere, CO, Lagrangian transport model

1 引言

研究表明(周秀骥和史久恩, 1995; Lelieveld et al., 2002; Filipiak et al., 2005; Li et al., 2005; Fu et al., 2006; 郑彬, 2007; Park et al., 2008),和同纬度地区相比较而言,夏季的 青藏高原及其周边区域存在一个 CO、水汽和 O₃ 等痕量成分持续异常的分布中心。由于平流层大 气痕量成分的变化所产生的辐射强迫将改变地气 系统的能量平衡,进而对全球气候变化产生重要 影响 (Stohl, 2003), 且夏季亚洲季风区是对流 活动十分旺盛的特殊区域之一(徐祥德等, 2001; 吴国雄等, 2002), 该地区南亚(青藏) 高压反气 旋为主要特征的特殊环流形势,可以向上伸展到 平流层下部(卞建春等,1997;苏东玉等, 2006),构成了全球对流层一平流层交换的重要通 道(杨健和昌达仁, 2004; 陈洪滨等, 2006; 樊 雯璇等,2008;吕达仁等,2008)。因此,对该区 域上对流层大气痕量异常分布形成的原因和近地 层大气污染物向平流层输送的相关过程进行探讨, 对于认识全球中层大气环流形成、变化机制和未 来气候变化预测等都有重要的理论意义和现实 价值。

最近,夏季亚洲季风区上对流层区域大气输 送过程成为研究的热点,如有研究(周任君和陈 月娟, 2005, 2006; Berthet et al., 2007; Park et al., 2007) 表明, 南亚高压控制下的亚洲季风区 对流层顶附近CO、O₃等异常大值区的存在和南亚 高压闭合环流及夏季低层的深对流活动有关。但 就目前研究情况而言, 亚洲季风区上对流层大气 痕量成分异常分布形成的相关大气输送过程及机 理还存在一定争议。如 Dessler and Sherwood (2004) 强调了深对流活动的重要作用, 但深对流 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(Liu and Zipser, 2005)。高 守亭和雷霆(1999)很早就提出了上对流层一平 流层污染物大尺度垂直输送的理论, Park et al. (2007) 和 Folkins et al. (2008) 则指出, 在深对 流的上方还存在大尺度的垂直输送作用。那么, 近地层的大气污染物如何到达对流层顶甚至更高 高度的区域? 其输送路径如何? 这些问题都需要 深入的研究。

CO 是平流层中的一种重要的大气污染物,通 过对 O₃的化学反应可以间接影响辐射平衡(Novelli et al., 1998)。由于实际观测数据较少,且卫 星观测数据在空间上分辨率相对较低,同时也不 便于输送过程的分析。且对流层中的 CO 主要产 生于不完全燃烧过程,其光化学反应周期最长可 达 2~3 个月(Xiao et al., 2007),可以作为一种 重要的大气污染示踪物(Bowman, 2006)。同时 也有研究指出,上对流层中的 CO 主要来自对流 层低层的排放(Jiang et al., 2007)。因此,本文 利用全球大气研究排放源数据(Emission Database for Global Atmosphere Research, EDGAR 3.2版本)的 CO 地表排放源数据,借助于 NCEP/NCAR 的全球预测系统(Global Forecast System, GFS)分析资料,驱动拉格朗日大气轨 迹输送模式 FLEXPART,对 2006年夏季亚洲季 风区近地层 CO 向上对流层输送的过程进行了模 拟,借助于数值模拟结果,初步探讨该区域 CO 异常分布形成原因及其相关机理。

2 资料和模式简介

2.1 CO 地表排放源数据

CO 排放源资料采用 EDGAR 3.2 版本。该数 据为全球 1°(纬度) ×1°(经度) 格点排放源资料。 对该排放源数据而言,东半球地表 CO 排放的大 值区域主要是非洲中部和南部、以印度和中南半 岛代表的南亚地区以及中国的东部等。对于该排 放源的详细描述参见 http://www.mnp.nl/edgar/[2009-05-20]。

2.2 卫星资料反演的 CO 浓度数据

2.2.1 MOPITT 卫星数据

MOPITT (Measurement Of Pollution In The Troposphere)卫星反演的 CO浓度数据为搭载在 美国 EOS (Earth Observation System)/Terra卫 星上的一个 8 通道的气体相关光谱仪所探测。 MOPITT 第一次连续全面地提供了覆盖全球范围 的 CO 观测数据,为检验大气模式可靠性等提供 了一个重要数据基础。目前能够提供的数据主要 是 CO 的柱总量和 6 层 (850、700、500、350、 250、150 hPa)垂直廓线混合比数据。该数据的 水平分辨率可达到 22 km,精度优于 1%,而垂直 分辨率可达到 3 km,精度偏差小于 10%。这里使 用的是 MOPITT 3 版本二级数据,经过定标和校 准、满足科研需要。

2.2.2 MLS 卫星数据

2004 年 7 月 15 日 NASA 发射了 Aura 卫星, 其携带的微波临边探测仪 EOS MLS (Earth Observing System Microwave Limb Sounder),可探 测大气痕量气体。该卫星有效等压面高度为 316~ 0.001 hPa (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 et al., 2005; Li et al., 2005; Fu et al., 2006; Jiang et al., 2007; Park et al., 2007)。本文使用的 CO 体积混和比资料为 MLS 产品 1.5 版本二级标准产品。研究表明,在平流层和上对流层 CO 和实测结果较为一致,体积分数误差范围在 2×10⁻¹⁰~3×10⁻¹⁰以内(Livesey et al., 2007)。

2.3 数值模式及模拟方案设置

拉格朗日大气轨迹输送模式 FLEXPART 通 过计算粒子(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.,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输送和扩散过 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,和其他轨迹模式相比,该模式还 考虑了湍流和中小尺度的对流过程。

目前, FLEXPART 已被应用于很多方面的研 究,主要包括大气污染中尺度输送过程、大气水 循环、对流层一平流层交换以及气候学尺度上全 球污染物的输送等。FLEXPART 所需要的气象场 资料(风、气压、温度等)可以由 ECMWF 再分 析数据或 NCEP/NCAR 再分析资料等提供,也可 以选用新一代中尺度预报模式和同化系统 (Weather Research Forecast, WRF) 输出的资 料。文中模式气象场输入为水平分辨率1°(纬度) ×1°(经度),一日4次(00时、06时、12时、18 时,协调世界时,下同)的 NCEP/NCAR 的 GFS 再分析资料。模拟时间为 2006 年 5 月 27 日至 9 月3日,模式每12小时输出一次日平均的格点 CO浓度以及通量数据,垂直方向11层(距离地 表面 3、5、7、9、12、14、16、18、20、22 km),模式输出数据空间分辨率为1°(纬度)×1° (经度),模式输出范围为(0°~80°N,0°~180°)。

3 模拟结果检验

由于模式在初始的积分时段内 CO 才开始排

放,考虑到 CO 的生命周期约 1~2个月,且近地 层大气污染物从边界层输送到下平流层中有时需 要几天甚至几十天,因此为了排除初始模式排放 源对模式模拟的 CO 浓度的影响,这里只对 2006 年7月和8月输出的结果进行分析。

首先,比较 MOPITT 观测的月平均 CO 浓度 分布和 FLEXPART 模式模拟结果。需要指出的 是, MOPITT 主要是针对对流层观测, 其最高高 度为 150 hPa。虽然 MOPITT 卫星资料在青藏高 原南侧等存在较多的缺测区,但在 150 hPa 高度 上主要存在两个大的异常中心(如图1所示),一 个是亚洲反气旋区域为主导(20°N~35°N, 60°E ~160°E),主要包括东亚的中国东部以及日本一 带、孟加拉湾、青藏高原及其南部周边区域,另 一个高值区域主要在非洲西部赤道附近。需要指 出的是,由于 FLEXPART 模式垂直方向上输出 结果并不是按照等压面输出, 而是输出等高度面 上。经过插值处理,将 FLEXPART 模式等高面 数据插值到等压面上。如图 2 所示,虽然 FLEX-PART 模式模拟结果和 MOPITT 卫星观测的 CO 浓度在此高度上还存在一些差异(如西亚上空),



图 1 MOPITT 卫星资料反演的 150 hPa 高度 2006 年 (a) 7 月和 (b) 8月 CO 体积分数月平均分布

Fig. 1 Mean CO volume fraction in (a) Jul and (b) Aug 2006 at the height of 150 hPa retrieved from Measurement Of Pollution In The Troposphere (MOPITT)

但总体可以看出在空间分布上具有相对较好的一 致性,且模式能更好地弥补卫星资料在高大地形 上缺测值较多的不足。

虽然 FLEXPART 模式模拟的 CO 浓度值大体 和 MOPITT 实际观测相当, 但需要指出的是, 大 多数模式模拟结果和实际观测结果相比往往低估 了 CO 浓度, 对此, Shindell et al. (2006) 指出, 这很可能是 CO 污染排放源的不准确所致。本研 究采用的 CO 排放源为 1979~2000 年的平均源, 实际上近年来经济和城市化发展迅速, CO 的排放 已远远超出模式初始化的排放源给出的排放量, 尤其是对东亚地区(包括印度半岛、中国等)CO 源排放估计可能存在较大偏差。比较图 2 和图 3 也可以发现,模拟结果和卫星资料反演结果的偏 差最大主要表现在东亚区域。另一个造成模拟结 果和卫星资料差异的原因就是模拟时间较短,从 地表释放的 CO 可能需要较长时间的输送才能到 达较高的高度,所以进一步的工作可以将模式积 分更长时间,以便于和观测资料进行比对。

从图 3 可见,模式模拟结果和 MLS 实际观测 的变化总体上是一致的,模式可以模拟出亚洲季 风区夏季大气 CO 含量存在季节内变化特征。但 同样发现,FLEXPART 模拟值偏低,部分区域





图 3 区域(15°N~35°N, 60°E~110°E)平均的 MLS 卫星观 测和 FLEXPART 模式模拟的 147 hPa 高度上 CO 体积分数的 变化

Time/d

Fig. 3 Variations of the area $(15^{\circ}N - 35^{\circ}N, 60^{\circ}E - 110^{\circ}E)$ averaged CO volume fraction derived from MLS observation and FLEXPART simulation at the height of 147 hPa

CO体积分数偏低约 2×10⁻⁸。另一方面,模式模 拟结果变化的振幅要小得多。该结果可以进一步 证实模拟的偏差可能主要是地表 CO 排放源分布 的不确定性造成的,所以 CO 合理排放源的确定 也是以后需要研究的一个重要问题。

4 对流参数化方案对模拟结果的影响

一般来说,粗分辨率的 NCEP 资料并不能很 好地描述中小尺度的对流和湍流混合过程(Kalney et al., 1996)。上文中, FLEXPART 采用了 最近发展的对流参数化方案(Forster et al., 2007),但如果将模式中对流参数化开关关闭,即 不考虑中小尺度对流的作用时, CO 等近地层大气 污染物只在大尺度的垂直输送作用下能否进入到 上对流层中? 这也是正确认识亚洲季风区夏季上 对流层物质输送和交换的重要议题。因此,采用 和上文中相同的模式模拟设置,进一步探讨对流 参数化方案对模拟结果的影响。从图 4 可以看出, 虽然没有考虑小尺度的夏季对流过程,但该高度 上的空间分布异常特征仍和卫星资料观测以及考 虑了对流参数化的模拟结果比较一致,这表明通 过大尺度的垂直输送亦可以使得近地层的大气污 染物向上垂直输送到平流层中。

但有无对流参数化方案能使模拟结果在数值 量级上存在差异,从图5可以看出,7月浓度相差





图 5 有无对流参数化方案时,模拟的 16 km 高度上 2006 年 (a) 7 月和 (b) 8 月 CO平均体积分数差值 (×10⁻⁹) Fig. 5 Difference of CO volume fraction (×10⁻⁹) between the simulation with and without convection parameterization scheme at the height of 16 km averaged for (a) Jul and (b) Aug 2006

最大区域主要在青藏高原南部和印度北部,而在8 月其浓度差别最大的区域位于印度半岛北部和阿 拉伯半岛上空,考虑了深对流的输送作用后模拟 结果和实际观测更为一致。因此,在亚洲季风区 夏季对流层向平流层的物质输送过程中,中小尺 度的对流过程和大尺度输送过程共同作用,使得 近地层的大气污染物输送到平流层中。比较而言, 大尺度输送过程要更重要一些。有关此问题的深 入研究,将另文讨论。

5 近地层向上对流层区域 CO 输送过程

数值模拟结果可以克服由于卫星资料观测空间分辨率较低的缺陷,因此,本节利用模式输出的 CO 通量结果,分析亚洲季风区内夏季上对流 层区域 CO 的输送过程。从图 6a 可见,在 5~14 km 高度的亚洲季风区对流层区域 15°N~40°N 为

CO高浓度区域,而在14~18 km高度的下平流层 区域,CO高浓度异常出现在10°N~25°N。

这种高浓度 CO 大气主要相关的输送过程如 何?分析在同纬度的 15°N~40°N 区域存在较强的 垂直输送通量(图 6d),尤其是在 15°N~25°N 的 副热带地区是近地层高 CO 浓度强的垂直抬升区, 可以发现,该区域和观测的出射长波资料(Outgoing Longwave Radiation, OLR)表征的强对流 区域(图略)相一致。这使得亚洲季风区内局地 近地层排放的 CO 可以很快地输送到上对流层中。 另外,从低层的经向输送通量分布(图 6b, 60°E ~110°E 平均并未包含北非区域),在对流层中下 层(小于 8 km)高度的 0°~25°N 区域,其经向输 送的 CO 通量为负,亦表明为东向的 CO 物质输 送。结合地表 CO 排放源和地表 3 km 高度上向上 的 CO 输送通量分布(图 7),可以发现,低纬的 纬向输送可能携带源于非洲中北部和阿拉伯半岛



图 6 FLEXPART 模式模拟的亚洲季风区 2006 年 7 月 1 日至 8 月 31 日 60°E~110°E 经向平均的高度一纬度剖面: (a) CO 体积分数 $(\times 10^{-9})$; (b) 经向 CO 平流通量(单位: $\mu g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, 西向的通量输送为正值,东向为负值); (c) 纬向 CO 平流通量(单位: $\mu g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,向极输送为正值,向赤道方向输送为负); (d) 垂直方向的 CO 通量(单位: $\mu g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$,向上为正值,向下为负值) Fig. 6 Height – latitude cross sections averaged between 60°E – 110°E from 1 Jul to 31 Aug 2006 over Asian monsoon regions simulated by FLEXPART model: (a) CO volume fraction (×10⁻⁹); (b) meridional CO advection flux (units: $\mu g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, westward is positive and eastward is negative); (c) zonal CO advection flux (units: $\mu g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, polarward is positive and equatorward is negative); (d) vertical CO advection flux (units: $\mu g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$, upward is positive and downward is negative)



图 7 2006 年 7~8 月平均的 3 km 高度上向上垂直输送的 CO 通量分布(单位: $\mu g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

Fig. 7 Distribution of mean vertical transport CO flux at the height of 3 km above ground level from Jul to Aug 2006 (units: $ug \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$)

的高 CO 浓度空气到达季风区内部。同样,从对 流层中低层的经向输送通量来看,0°~35°N 区域 为低纬度向高纬度地区的 CO 通量输送。这一经 向的输送过程,加上局地深对流和大尺度地形的 抬升作用(Li et al.,2005),使得低纬度地区 (如印度半岛)的高 CO 浓度大气和源于远距离排 放源的高 CO 浓度大气被输送到亚洲季风区的 内部。

以上讨论了亚洲季风区内对流层中上层 CO 高浓度异常分布形成的可能输送路径。从图 6a 中 亦可以发现在下平流层中,约16~18 km 高度上 CO的大值区域位置发生了偏移,其主要分布在 25°N以南的低纬度地区。该区域 CO 浓度极大值 形成和向南偏移可能主要由以下原因引起:首先, 在16~18 km 高度, 垂直输送强度减小, 大尺度 垂直运动和中小尺度对流的垂直输送在 16 km 高 度已经很小,一般小于 $0.1 \ \mu g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ (图 6d);其次,在下平流层区域,亚洲夏季风反气旋 增强,使得向上输送到该高度的 CO 高浓度大气 被限制在反气旋内部,而在12~18 km 高度上的 0°~20°N区域为强的高纬度向低纬度地区的输送 通量,该通量使得通过垂直输送到下平流层的 CO 高浓度大气向赤道地区输送, CO 高浓度区域偏离 了原来强的垂直抬升区。

6 结论和讨论

通过将 EDGAR 3.2 版本全球 CO 格点排放源

加入到拉格朗日粒子扩散模式中,模拟了 2006 年 6~8月近地层大气污染物向上对流层物质输送过 程。检验了模式的模拟性能,且依据模拟结果, 分析了亚洲季风区 CO 异常分布形成的输送过程。 主要结论如下:

(1) FLEXPART 模拟结果和实际卫星观测的 上对流层区域 CO 浓度值存在差异,部分区域体 积分数要低约 2×10⁻⁸。另一方面,虽然模式模拟 结果时间变化的振幅要小,但在空间分布和时间 变化的周期上具有一致性。

(2)即使不考虑小尺度的对流过程,大尺度 的垂直输送作用亦可以将近地层的大气污染物输 送到平流层中,但模拟结果偏差进一步增大。这 表明亚洲季风区上对流层区域 CO 大值区的形成 是中小尺度对流抬升和大尺度输送的共同影响, 但大尺度输送过程影响程度更大。

(3)中上层对流层中高度(6~14 km)的15[°]N~ 40[°]N,尤其15[°]N~25[°]N是CO浓度极大值的分布 区。亚洲季风区内对流层内部的高CO异常分布 形成的输送机制主要有两个:一方面是强的大尺 度抬升和中小尺度对流在垂直方向的输送作用, 使得局地区域对流层下部的高CO浓度大气可以 很快抬升到上对流层中,另一方面是中低对流层 的东向和极向输送过程,可能使得源于印度中南 部、阿拉伯半岛甚至非洲中部的远距离的高CO 浓度大气可以输送到亚洲季风区内,为CO提供 了远距离输送源,使得对流层中高层CO的异常 分布特征更加显著。正是这两个原因使得亚洲季 风区内部对流层中上层为一个高CO浓度的大 值区。

(4)和上对流层区域垂直抬升输送的大值区 域相比,下平流层(约16~18 km高度)中CO 大值区域的分布位置向南偏移,主要分布在25°N 以南的低纬度地区。该区域CO浓度极大值形成 和向南偏移主要和垂直输送减弱、下平流层区域 向赤道地区的纬向输送、亚洲反气旋以及热带东 风急流加强有关。

需要指出的是,模式模拟结果能较好地模拟 出上对流层区域 CO 的时空分布,但在数量上还 存在一定的偏差,地表 CO 排放源分布的不确定 性可能是造成这种结果的主要原因之一。CO 合理 排放源的确定是以后需要研究的一个重要问题。 **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 给予了详尽的解释;美国宇航局喷气推进实验室提供了 EOS MLS 和 AIRS 卫星反演产品资料,在此一并表示 感谢。

参考文献 (References)

- Berthet G, Esler J, 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.
- Bowman K. 2006. Transport of carbon monoxide from the tropics to the extratropics [J]. J. Geophys. Res., 111, D02107, doi: 10.1029/2005JD006137.
- Dessler A, Sherwood S C. 2004. The effect of convection on the summertime extratropical lower stratosphere [J]. 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 [J]. Geophys. Res. Lett., 32, L14825, doi: 10.1029/ 2005GL022765.
- Folkins I, Fueglistaler S, Lesins G, et al. 2008. A low level circulation in the tropics [J]. J. Atmos. Sci., 65: 1019-1034.
- 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. Shortcircuit 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.
- Jiang J H, Livesey N J, Su H. 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 [J]. Geophys. Res. Lett., 34, L18812, doi: 10.1029/2007GL030638.
- Kalney E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/ NCAR 40 year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437-471.
- Lelieveld J, Berresheim H, Borrmann S. 2002. Global air pollution crossroads over the Mediterranean [J]. Science, 298: 794 - 799.
- 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.
- Liu C, Zipser E J. 2005. Global distribution of convection penetrating the tropical tropopause [J]. J. Geophys. Res., 110, D23104, doi: 10.1029/2005JD006063.

- Livesey N J, Filipiak M J, Froidevaux L, et al. 2007. Validation of Aura microwave limb sounder O₃ and CO observations in the upper troposphere and lower stratosphere [J]. J. Geophys. Res., doi: 10.1029/2007JD008805.
- Novelli P, Masarie K, Lan g P. 1998. Distributions and recent changes of carbon monoxide in the lower troposphere [J]. J. Geophys. Res., 103 (D15): 19015-19033.
- 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.
- Shindell D T, Faluvegi G, Miller R L, et al. 2006. Solar and anthropogenic forcing of tropical hydrology [J]. Geophys. Res. Lett., 33, L24706, doi: 10.1029/2006GL027468.
- Stohl A, Forster C, Frank A, et al. 2005. Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 5: 2461– 2474.
- Stohl A. 2003. Stratosphere troposphere exchange: A review, and what we have learned from STACCATO [J]. J. Geophys. Res., 108 (D12), 8516, doi: 10.1029/2002JD002490.
- Xiao Y, Jacob D J, Turquety S. 2007. Atmospheric acetylene and its relationship with CO as an indicator of air mass age [J]. J. Geophys. Res., 112, D12305, doi: 10.1029/2006JD008268.
- 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 Xiuji. 1997. Analysis of the seasonal variation feature of the wind structure over Tibetan Plateau and its surroundings [M] // Zhou Xiuji. Atomospheric Ozone and Its Impact on Climate and Environment in China (II) (in Chinese). Beijing, China Meteorological Press, 257-273.
- 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 Scicences (in Chinese), 30 (5): 813-820.
- 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.
- 高守亭, 雷霆. 1999. 污染物大尺度垂直输送的理论研究 [J]. 气 候与环境研究, 4 (2): 268 274. Gao Shouting, Lei Ting.

1999. Large scale vertical transport theory of pollutants [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (2): 268 - 274.

- 吕达仁,陈泽宇,卞建春,等. 2008. 平流层一对流层相互作用的 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 Scicences (in Chinese), 32 (4): 782-793.
- 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 Yaoqing, 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—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. The comprehensive dynamical, thermal structure image for the process land surface and atmosphere interaction over Tibetan Plateau [J]. Science in China (Ser. 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 Atmosphereic Sciences (in Chinese), 28 (2): 294-300.
- 郑彬. 2007. HALOE 资料揭示的热带平流层 CH4 时空变化特征
 [J]. 气候与环境研究, 12 (2): 181-187. Zheng Bin. 2007.
 Temporal and spatial features of tropical stratospheric CH4 from the Halogen Occultation Experiment [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (2): 181-187.
- 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 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 (6): 899-908.
- 周任君,陈月娟. 2006. 1998 年青藏高原臭氧低值中心异常及其 背景环流场的分析 [J]. 气候与环境研究,11 (2): 169-174. Zhou Renjun, Chen Yuejuan. 2006. Anomaly of the ozone low center over the Tibetan Plateau in 1998 and the surrounding flow field [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese),11 (2): 169-174.
- 周秀骥, 史久恩. 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 Xiuji, Shi Jiuen. 1995. The column ozone variation in China and the low value centre over Tibetan Plateau [J]. Science Bulletin (in Chinese), 40 (15): 1396-1398.