岑炬辉,何文英,陈洪滨. 2019. MOPITT与MLS观测的CO在200 hPa的差异及其原因分析 [J]. 气候与环境研究, 24(5): 567-575. CEN Juhui, HE Wenying, CHEN Hongbin. 2019. Differences between CO Concentrations from MOPITT Data and MLS Data at 200 hPa and Their Cause Analysis [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24(5): 567-575. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18106

MOPITT与MLS观测的CO浓度在200 hPa的 差异及其原因分析

岑炬辉1 何文英2 陈洪滨2

1 宁波市气象局,浙江宁波 315012 2 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 具有较优垂直分辨率和反演精度的MLS(Microwave Limb Sounder)数据与MOPITT(Measurements of Pollution in the Troposphere)数据在上对流层一下平流层(UT-LS)区域有一个交集,因而将MOPITT与MLS测量的200 hPa高度上CO数据进行对比分析。比较结果显示,两者在中低纬度分布较为接近,在非洲中西部、南美中北部和东南亚地区均有大范围高值中心区存在;MOPITT CO在浓度值上明显高于MLS CO,并且MOPITT CO浓度在低纬度存在约35 ppb(10⁶)的全球性系统性偏差。通过CALIOP云层数据对MOPITT和MLS CO差异原因进行分析,表明CO高值区的形成与旺盛的对流有关。

关键词 CO MOPITT 数据 MLS 数据 上对流层一下平流层
文章编号 1006-9585(2019)05-0567-09 中图分类号 P412.27 文献标识码 A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18106

Differences between CO Concentrations from MOPITT Data and MLS Data at 200 hPa and Their Cause Analysis

CEN Juhui¹, HE Wenying², and CHEN Hongbin²

1 Ningbo Meteorological Office, Ningbo, Zhejiang Province 315012

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

Abstract Data from the microwave limb sounder (MLS) has better vertical resolution and inversion accuracy but intersects with measurements of pollution in the troposphere (MOPITT) data from the upper troposphere-lower stratosphere (UT-LS) region. In this paper, we compare MOPITT CO data with MLS CO data at 200 hPa. The results indicate that the CO distributions of both are similar in the middle and low latitudes, and high CO concentrations occur in Midwest, South-Central, and South-East Asia. In general, the concentration values of MOPITT CO are higher than those of MLS, and MOPITT CO shows a global system bias of about 35 ppb (10⁻⁶) at low latitudes. The difference between MOPITT and MLS CO values was analyzed using CALIOP cloud data, and it was found that the occurrence of high CO concentration zones is related to strong convection.

Keywords CO, MOPITT data, MLS data, upper troposphere-lower stratosphere

收稿日期 2018-07-23; 网络预出版日期 2019-03-25

作者简介 岑炬辉,男,1984年出生,博士,主要从事微波遥感理论和应用研究。E-mail: 289778982@qq.com

通讯作者 何文英, E-mail: hwy@mail.iap.ac.cn

Funded by the National Natural Science Foundation of China (Grant 41575033), Ningbo Meteorological Science and Technology Projec (Grant NBQX2017010B), Zhejiang Meteorological Science and Technology Project (Grant 2018QN09)

资助项目 国家自然科学基金项目41575033,宁波市气象科技计划项目NBQX2017010B,浙江省气象科技计划项目2018QN09

1 引言

自工业革命以来,人类活动对大气成分和大气 辐射收支产生了重要的影响,从而导致了显著的气 候变化(IPCC, 2007)。2012年发布的 IPCC 第五 次报告中显示,相对于1750年,2011年总人为辐 射强迫值为2.29 W/m²,其中由CO排放所产生的辐 射强迫达到了0.23 W/m²,显示了CO在气候变化和 全球环境中的重要作用。从20世纪80、90年代开 始,科学家们就开始对CO的变化进行研究。20世 纪50年代至1987年,全球CO浓度一直处于增长 状态 (Khalil et al., 1988; Zander et al., 1989), Petrenko et al. (2013) 通过分析格林兰积雪中的空 气,重建了1950年以来60年期间北半球高纬地区 CO的变化趋势,结论也与此一致。从1988年至 1997年,则是一个全球CO减少的阶段(Khalil et al., 1994; Novelli et al., 1994, 1998, 2003)。进 入21世纪,CO的全球性变化趋势变弱(Fortems-Cheiney et al., 2011),即使有变化其原因也在很大 程度上与森林大火、火山爆发等事件相关联。但近 几年CO的变化趋势又逐渐变得明显,联合使用多 颗卫星数据显示近10年中国和美国的CO浓度都是 处于下降趋势,下降速率约为0.92%/a (Worden et al., 2013); 美国学士山天文台2004~2013年的观 测结果显示CO的下降趋势在1.9%/a(Gratz et al., 2015)。然而目前CO发生变化的原因尚不明确, 尤其是已有研究显示北美和西欧CO下降及中国 CO正在增加(Strode et al., 2016), 这需要对全球 CO变化及归因进行更加深入的研究。

由于大气中CO寿命一般在几周至两个月之 间,因而对其变化的研究需要长期持续性观测作为 基础。为了监测全球 CO 的变化,在过去的十几 年,美国、欧洲和日本相继发射了一系列卫星载 荷,如 MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere), AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer), (Tropospheric Emission Spectrometer) TES Imaging Absorption SCIAMACHY (Scanning spectrometer for Atmospheric Chartography), ACE-FTS (Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer) 和 MLS (Microwave Limb Sounder)。其中ACE-FTS和MLS拥有最优的 垂直分辨率和反演精度,这也是由其掩星和临边这

两种观测方式所决定的,同时,这两种观测方式也 决定了 ACE-FTS 和 MLS 数据量稀少。在进行资料 分析时, MLS资料只能做纬向或季节平均来使用, 而ACE-FTS更是只有极少量的廓线,一般只能用 来作为验证和对比分析。作为专门进行对流层CO 观测的 MOPITT 仪器,就目前来说,是对流层 CO 廓线和柱总量产品的最主要提供者。这不仅是因为 MOPITT 拥有最长的观测时间、较高的时空分辨 率、较高的反演精度(在10%精度内),上对流层 的 MOPITT CO 与 ACE-FTS 和 HIPPO-QCLS (HIAPER Pole to Pole Observations-Quantum Cascade Laser Spectrometer Quantum Cascade Laser Spectrometer) 具有一致性(Martínez-Alonso et al., 2014),而且其观测结果还被作为AIRS、TES等卫 星反演时的约束条件。但是近年来MOPITT数据质 量暴露出两个问题。其一是 MOPITT 的定位系统出 现了偏差,使得MOPITT降轨数据中的经度位置比 实际位置要向西偏移0.3°~0.4°,而升轨时也有类 似但反向的偏移,偏移量约为1个MOPITT观测像 元,这一问题影响MOPITT V3-V5版本中所有的数 据。其二与MOPITT二级产品(Level 2)数据反演 时使用的气候态水汽数据有关。用 MOPITT 观测的 辐射值来反演CO浓度廓线时,需要向反演算法输 入温度和水汽廓线作为辅助数据。目前MOPITT使 用的辅助数据是 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)再分析资料的温度和水 汽廓线,然而NCEP水汽廓线有时会出现一些不具 备物理意义的异常值,从而导致反演算法无法正常 运行。在这种情况下,气候态水汽资料会被用来取 代那些异常值,然后进行 MOPITT 产品反演。通过 MOPITT V5 数据与 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) ESRL (Earth System Research Laboratory) GMD (Global Monitoring Division) 原位观测数据、HIPPO (HIaper Pole to Pole Observations) 廓线数据进行对比验证,发现 无论是定位偏差还是水汽资料的替换, 对验证结果 的总体偏差以及标准差等统计值在各个高度上的影 响都小于1% (Deeter et al., 2013), 也表明这两个 问题对于验证结果的影响并不显著。此外, MOPITT V5 TIR/NIR 数据和GMD 数据廓线的对比 验证发现, MOPITT V5 TIR/NIR 数据随着时间存 在偏移,即在不同高度分别是800 hPa-1.63%/a, 600 hPa -0.80%/a, 400 hPa 1.53%/a 以及 200 hPa

2.33%/a。然而无论是NOAA ESRL GMD 原位观测数据还是HIPPO 廓线数据都是源自美国或东太平洋区域上获取上,对于MOPITT数据在全球范围的普适性需要进一步验证。MOPITT和亚马逊盆地4个原位观测站点2010~2013年的低对流层数据进行对比显示,MOPITT CO 明显偏小(Deeter et al., 2016)。可见 MOPITT CO 的数据质量需要在使用前进一步验证。

由于 MOPITT 数据和 MLS 数据在上对流层一下平流层(UT-LS)区域有一个交集,两者的产品都包含200 hPa的 CO浓度值,并且 MLS 具有最优 垂直分辨率和反演精度,因而本文将使用 MLS 测量的 CO 数据作参考,对比分析 MOPITT CO 数据 质量。虽然两者的直接数值对比因时空匹配问题难 以进行,但是两者在变化趋势、高值区分布、数据 相关性等方面仍有很高的可比性。

2 资料介绍

2.1 MOPITT资料

MOPITT(Measurements of Pollution in the Troposphere)是搭载于1999年12月发射的Terra卫 星上的5个仪器之一,于2000年3月开始提供常规 科学观测数据。由于采用跨轨扫描方式,基本每3 d MOPITT就可以实现一次全球覆盖,水平分辨率 为22 km×22 km。MOPITT通过观测近红外2.3 µm和热红外4.6µm两个光谱段的辐射,反演得到 对流层CO廓线分布和柱总量。由于MOPITT不能 在有云条件下观测对流层CO,因而使用搭载于同 一卫星上的MODIS 仪器的云产品进行云检测。 MOPITT数据和原位观测数据对比验证工作一直在 进行(Emmons et al., 2004, 2007, 2009),目前 其反演产品的精度优于15%。

本文采用 2007~2013 年 MOPITT V5 L2 热红 外和近红外通道联合反演(TIR/NIR)的CO产品, 此产品提供 10 个高度层的 CO 体混合比廓线 (https://eosweb.larc.nasa.gov/project/mopitt/ mopitt_table [2017-07-21])。

2.2 MLS资料

微波临边探测器(Microwave Limb Sounder, MLS)搭载在AURA卫星上。MLS每24.7 s 垂直扫描飞行器前方大约3000 km的临边大气,观测切线高度在8~90 km,轨道周期为98.9 min,每圈扫描

240次,每天大约扫描3500次,观测间隔为1/6 s。 覆盖范围为82°S~82°N的大气层。MLS包含5个 频段的微波辐射计,其中4个GHz频段辐射计的中 心频率分别为118 GHz、190 GHz、240 GHz和640 GHz,THz辐射计的中心频率为2.5 THz。观测CO 的谱线频率是230.5 GHz,位于240 GHz微波辐射 计频段中。在215 hPa上CO的水平分辨率5.5 km×700 km,反演精度为19 ppb(10°);在100 hPa上,其水平分辨率为4.5 km×450 km,反演精 度为14 ppb;垂直分辨率为3.5~5 km。本文采用 2007~2013年MLS V3.3 L2 CO数据,此产品的指 定等压面为1000×10^{-(N-1)6}hPa(N为从低到高产品 的层数),CO遥感反演的最低有效高度为215 hPa。 2.3 CALIOP资料

美国美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 和 法国国家太空研究中心 (Centre National d' Etudes Spatiales, CNES) 联合研制的 CALIOP (Cloud-Aerosol LIdar with Orthogonal Polarization) 搭载在 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations) 上, 于 2006年4月8日升空,该卫星运行于705km高度的 太阳同步轨道上,轨道倾角为98.2°。CALIOP采用 正交双偏振技术,是首个应用型的星载云和气溶胶 激光雷达, 拥有3个通道(1064 nm、532 nm 垂直 和水平偏振),脉冲重复频率为20Hz。CALIOP提 供大范围高分辨率的大气垂直剖面扫描数据,其垂 直分辨率随着高度增加而减小,在0.5~8.2 km高 度范围内,垂直分辨率30m,水平分辨率333m; 8.2~20.2 km范围内, 垂直分辨率为60 m, 水平分 辨率为1 km;继续往上分辨率更粗。本文使用的 是 CALIOP 的二级产品: 5 km 平均的云层资料 (level2 Clay05km)。

2.4 OLR资料

出射长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)是指地球大气系统在大气层顶向外太空辐射 出去的红外热辐射能量通量,其大小主要由发射下 垫面和云顶的温度所决定(蒋尚诚等,1990),由 NOAA 极轨卫星观测获得。在低纬热带地区, OLR 表征着对流活动的强弱,OLR 的高值区反映 了大规模空气下沉晴空区,OLR 低值区代表对流 上升区或夏季降水区(蒋尚诚等,1990)。本章使 用NOAA 官网提供的多年逐月平均2.5°(纬度)× 2.5°(经度)的 OLR 格点资料(http://www.esrl. noaa. gov/psd/data/gridded/data. interp_OLR. html [2017-07-27])。

3 MOPITT与MLS CO的数据分析

3.1 MOPITT和MLS在200 hPa高度上季节平均 格点数据的对比分析

由于 MOPITT 数据和 MLS 数据在上对流层一下平流层(UT-LS)区域有一个交集,两者的产品都包含200 hPa 附近的 CO浓度值,因而本文将使用 MLS 测量的 CO 数据作对比,来进一步分析 MOPITT CO 数据质量。

3.1.1 全球季节变化

由于时空匹配问题,MOPITT与MLS CO浓度 的直接数值对比难以进行,因而本文的工作是对多 年平均的格点数据进行分析。

从图1中可见, MOPITT 和 MLS 测量的 200 hPa CO浓度整体分布形式比较接近。在春季, MOPITT CO浓度有两个强高值中心,分别位于南 美洲赤道附近以及非洲西部赤道附近,此位置与 MLS CO浓度的两个高值中心位置一致。此外, MOPITT CO浓度在东南亚上空还有一片次高值 区,而MLS CO浓度则在东南亚有一个钩状的高值 区。夏季,两种资料都显示南美洲赤道附近以及非 洲西部赤道附近的高值区范围和强度都有所减弱, 而在东南亚上空的高值区得到了明显的加强,即两 者在CO浓度高值区范围和变化趋势上保持一致。 秋季, MOPITT 和 MLS CO浓度在南美和非洲的高 值中心区都出现了加强,东南亚的高值中心又变为 了次高值中心,分布态势与春季类似。相比较而 言, MLS CO浓度此时在两个高值区产生了全年最 强的两个中心,而其东南亚的高值区则明显减弱。 到了冬季, MOPITT CO浓度在南美洲和非洲的高 值中心区和春秋两季类似,但稍弱于春秋两季。 MLS CO浓度在这两个区域的高值中心区位置与秋 季保持一致,但是强度明显减弱。MOPITT CO浓 度在南亚上空的高值中心向南移动到印度洋、印度 尼西亚、马来西亚交界附近区域,整个高值区范围 也有所减弱, MLS CO在此区域的高值区域变化与 MOPITTCO一致。

通过以上4个季节的 MOPITT 和 MLS CO 对比,可以看出两者 CO 的主要分布与季节变化,无

论强度还是范围都非常类似,也表明两者数据反演的合理性。不过,通过图1中左图与右图对比可以看到两者存在着不少的差异。其一,MOPITT CO的浓度普遍高于MLS CO。其二,MOPITT CO春、秋、冬3个季节的高值区一致性较高,夏季则出现高值区和次高值区的转换;而MLS CO不同季节之间的差异更显著,其中南美洲赤道附近以及非洲西部赤道附近区域在秋季要明显强于其它季节,东南亚区域的高值中心和MOPITT CO类似,也是出现在夏季。其三,MOPITT CO的3个高值区之间有特别明显的连通区域,而MLS CO的3个高值区之间,则更倾向于互相独立。

3.1.2 概率密度分布比较

为了更好地了解 MOPITT 和 MLS CO 200 hPa 上数据的整体分布情况,对 2007~2013年的 MOPITT 和 MLS CO 数据进一步进行概率密度函数 PDF (Probability Density Functions) 分析,结果如 图2所示,实线为MLS,虚线为MOPITT。从图2 可见,在春季,MLS和MOPITT的COPDF均呈现 出双峰结构,其中MLS 的峰值分别出现在CO浓 度为55 ppb和75 ppb, MOPITT的峰值则分别出现 在CO浓度为45 ppb 和70 ppb。在夏季, MLS 和 MOPITT 的 CO PDF 都是只有一个尖锐的单峰,分 别位于 55 ppb 和 50 ppb。秋季, MLS 和 MOPITT CO的PDF 都呈现一个较平缓的单峰,峰值分别处 于65 ppb和55 ppb处。在冬季, MLS CO PDF 呈现 出尖锐的单峰,峰值在70 ppb处,而 MOPITT CO PDF 是一个近似双峰结构,但是两个峰很靠近,也 可认为是一个平缓的单峰。

从图2总体上来看,MOPITT和MLS CO浓度的峰值都是出现在40~80 ppb,MLS CO浓度的峰值在所有季节都明显高于MOPITT CO,而且峰形更尖锐。而在100 ppb以上区间,可以看到MOPITT CO的分布明显要高于MLS CO。这与图1中MOPITT CO的浓度值普遍高于MLS CO相一致,应该是MOPITT CO和MLS CO观测方式和反演算法方面的差异所造成的。MOPITT CO核函数在200 hPa的权重约为0.2左右,而MLS CO约为0.9,这意味着MOPITT CO在200 hPa的数据包含了更多其他高度的信息,即包括了中上层对流层CO浓度的信息。因为对流层CO的浓度是随着高度的增加而降低,因此对于同一高度的反演产品,MOPITT 的结果肯定要比MLS 略高。权重函数的



图1 2007~2013年平均四季200 hPa MOPITT CO浓度(左列)与MLS CO浓度(右列)分布(单位: ppb): (a、b)春季、(c、d)夏季、(e、f)秋季、(g、h)冬季

Fig. 1 MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere) CO concentration (left column) and MLS (Measurements of Pollution in the Troposphere) CO concentration (right column) at 200 hPa in (a, b) spring, (c, d) summer, (e, f) autumn, and (g, h) winter during 2007–2013 (units: ppb)



图 2 2007~2013 年全球 60°S~60°N 范围内 200 hPa MLS CO浓度(实线)和 MOPITT CO浓度(虚线) 5°(纬度)×5°(经度)格点数据的不同季节 PDF 分布

Fig. 2 200-hPa PDF (Probability Density Functions) distribution of MLS CO concentration and MOPITT CO concentration $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ grid point data between 60° S and 60° N in all four seasons during 2007–2013

这一特征,也使得 MOPITT CO 的结果较为平滑, 而 MLS CO则有很高的垂直分辨率,且受中高层云 的影响很小。

3.1.3 相关性分析

图 3a-3d显示在 200 hPa 高度上 2007~2013 年季节平均的 MOPITT 和 MLS CO 浓度 5°(纬度)×5°(经度)格点数据的散点图及线性拟合直线。MOPITT和 MLS CO之间的相关系数分别达到了 80.7%(春)、78.9%(夏)、81.9%(秋)和 80.0%(冬)。虽然有接近 80%的相关系数,但是其斜率分别为1.5(春)、1.2(夏)、1.6(秋)、1.6(冬),并不是呈对角线趋势分布。对图 3a-3d进行仔细观察还可以发现,低值部分的点排列紧密并且呈线性分布,这部分是 MOPITT 与 MLS CO 相关性最好的部分。随着 MOPITT CO浓度值的上升,对应的 MLS CO 分布较离散,而且散点的分布整体上更趋向于 S型而不是直线。其原因在下一小节中分析,然后给出订正。

3.2 MOPITT与MLS CO的差值分析

为了认识 MOPITT 和 MLS CO 比较中出现的 显著差异,我们进一步采用2007~2013年的 MLS 和 MOPITT CO 5°(纬度)×5°(经度)格点平均 的不同季节差值资料,并结合 CALIOP 5 km 云层 资料和 OLR 资料,对 MLS 和 MOPITT CO 差值在 200 hPa 的分布特性进行综合分析。

图4左列是4个季节的200 hPa高度上MLS和 MOPITT CO浓度差值图(MLS-MOPITT),图中 的黑色虚线为OLR等值线;右列为同时期CALIOP 云层资料计算的200 hPa高度以上的云概率分布图。 从图4a、4c、4e、4g中可以看到,在南北纬30°附 近出现了纬向的强梯度带,将CO浓度差值分布划 分为两个泾渭分明的区域:低纬的高差值区(强负 值)和中纬的低差值区(小正值)。在右边的云概 率图上,4个季节的云覆盖率都有3个类似的高值 区,分别为南美洲中北部、非洲中部、从北印度洋 至西太平洋并覆盖东南亚的大片区域。对比图1, 可以发现云概率偏高区域与MOPITT和MLS CO的



图3 2007~2013年200 hPa春季(第一列)、夏季(第二列)、秋季(第三列)、冬季(第四列)季节平均的MLS与MOPITT CO浓度数据的散点与拟合线:(a-d)原始格点数据与拟合;(e-h)中纬和低纬分区数据与拟合;(i-l)低纬调整后拟合

Fig. 3 Scatter plots of MOPITT and MLS CO concentration data at 200 hPa in spring (first column), summer (second column), autumn (third column), and winter (fourth column): (a-d): original global data; (e-h): plots of middle-latitude and low-latitude partition data; and (i-l): plots and linear fitting after low-latitude adjustment

高值区分布相一致。同时,这些区域又对应着 OLR低值中心,这说明200 hPa高度上CO高值区 的形成与旺盛的对流有关。

从图4还可以看到,MOPITT和MLS CO浓度 的高差值区基本覆盖了整个低纬度地区,在这一点 上云覆盖率图并没有类似的表现。对图4进行更仔 细的分析可以得到,在南美洲中北部、非洲中部和 东南亚这几个区域,差值显得要比周围区域略小, 证明这两者之间存在着某些关联。

在前面图 3a-3d 的分析中提到,200 hPa上 MOPITT 和 MLS CO 虽然有较高的相关性,但并 不是呈对角线趋势分布,散点的分布整体上更趋 向于 S 型而不是直线。而在图4中看到,MOPITT 和 MLS CO 差值在 200 hPa上被南北纬 30°附近的 梯度带分成了两个差异很大的区域。这两者之间 是否存在一定的联系?接下来将对这一问题进行 分析。

首先将 200 hPa上 MOPITT 和 MLS CO数据都 以南北纬 30°作为分界线分为两组,然后再分别进 行拟合,结果如图 3e-3h所示,其中绿色为低纬度 数据(30°S~30°N),蓝色为中纬度数据(高于南 北纬 30°)。从图中可以看到,在春季,低纬和中 纬分组之后的 MOPITT 和 MLS CO数据之间相关系 数从分组前的 80.7% 变为 82.1% 和 90.9%,斜率也 从分组前的 1.5 变为 1.1 和 0.96。在夏季,分组之前 相关系数为 78.9%,斜率为 1.2,在分组之后,相 关系数分别达到 85.6% 和 86.8%,斜率也变为了 0.96 和 1.1。秋季的数据进行分组后改进效果较差, 在分组前相关系数为 81.9%,斜率为 1.6;在分组 后,低纬的相关系数为 78.8%,斜率为 0.94,高纬 的相关系数也只有 81.7%,斜率与分组前一样是 1.6。冬季在分组前相关系数为 80.0%,斜率为 1.6;



图 4 200 hPa 上 MLS 与 MOPITT CO 浓度差值(MLS CO-MOPITT CO)(单位: ppb)(左列,等值线为 OLR 资料,单位: W/m²)和 CALIOP 200 hPa 之上的云概率分布(右列,单位:%):(a、b)春季;(c、d)夏季;(e、f)秋季;(g、h)冬季

Fig. 4 Difference between MLS and MOPITT CO concentration values (ppb) at 200 hPa with OLR (Outgoing Longwave Radiation) contours (W/m²) (left column) and CALIOP cloud probability at 200 hPa (right column) in (a, b) spring, (c, d) summer, (e, f) autumn, and (g, h) winter

分组后,相关系数分别为0.78%和83.6%,斜率分 别为0.9和1.2。

从以上数据可以看到,将MOPITT和MLS CO 分组之后,多数情况下拟合结果有了明显改善。对 于秋季的例外,从图4中可以找出其原因:秋季的 北半球中纬度 CO差值并没有像其它季节那样呈现 淡黄色,从而使得南北纬30°梯度带这一条件在秋 季的北半球并不成立,从而导致了最后结果的偏离 (拟合斜率1.6)。但是可以看到,这种情况只发生 在秋季,在其他季节,分组拟合之后,斜率都更接 近于1,这表明 MOPITT和 MLS CO在这种分组状 态下,相互之间的一致性得到了明显提升,并且散 点图也都呈现出线性分布趋势。

从图 3e-3h 可以看到, 4个季节的低纬度拟合 线(绿色)都有一个很明显的偏移,平均来看, 这个值(bias)在35 ppb 左右。将低纬 MOPITT CO的数据减去35 ppb之后再次与MLS CO进行拟 合,得到结果如图3i-31所示。可以看到,经过调 整后的 MLS 和 MOPITT CO 几乎都拟合在对角线 上,各个季节的斜率都在1.0~1.1,相关系数也有 了一定的提升,春夏秋冬4个季节分别提升了 7.5%、7.6%、1.4%、3.2%,两者的均方根误差更 是从30 ppb左右减少到13 ppb左右。可见,除去这 一偏差后的 MOPITT CO 数据与 MLS CO 数据表现 出更好的一致性。鉴于 MLS CO 数据是现今除了掩 星观测之外可信度最高的卫星观测数据,不仅有较 高的垂直分辨率,其观测反演不受中低云的影响, 数据精度也要优于其他使用红外通道探测的卫星, 因而在 MLS CO 可靠性基础上得到的这个比对调整 结果是值得信赖的。MOPITT CO的这种系统性偏 差,一部分是受作为先验廓线的再分析资料相关特 性的影响,另一部分是在对流旺盛区两个仪器的观 测存在差异的影响。目前对中高层大气进行模拟所 需要的卫星观测数据,基本上是两周左右才能实现 一次全球覆盖,因而再分析资料会不可避免的带有 较强的气候态特征,出现以纬度为分界的条带特 征。而出现在纬度小于南北纬30°区域,则是因为 这一区域正是CO的主要变化区域(图1)。 MOPITT不能在有云的条件下实现对CO的遥感反 演,对云的处理是采用同星搭载的 MODIS 所提供 的云掩膜资料来将有云的观测资料剔除掉,而 MLS则可以在有云条件下进行观测。在云高概率 区域(比如80%以上有云的区域),就会出现 MOPITT资料变成了选择性观测,而无法提供平均态的资料,因而造成了与MLS资料之间的差异。以上两点都在MOPITT的偏差中起到了重要作用,但具体的确认需要对反演过程和算法进行分析,目前由于相关算法不公开,故需要将来再进行深入研究。

4 总结

本文使用 2007~2013 年的 MOPITT 和 MLS CO 格点数据,重点分析了在 200 hPa MOPITT 与 MLS 观测的 CO 数据的差异,同时结合卫星出射红 外辐射(OLR)和CALIOP 云产品数据,分析对流 云对 MOPITT CO 产品的可能影响。主要结果 如下:

(1) 在 200 hPa上, 两者观测的 CO 在中低纬 度有近似分布; MOPITT CO 在量值上明显高于 MLS CO; MOPITT CO 的高值区趋向于连续分布, 而 MLS CO 的高值区相对独立分布,这是由于两者 的观测和反演方式不同所导致的(MOPITT CO 星 下点观测和MLS CO 临边观测)。

(2) 在 200 hPa上, MOPITT 与 MLS 观测 CO 的原始数据相关性在 80% 左右; MOPITT CO 在南 北纬 30°附近存在着明显的数据分界,进行纬度分 区和去偏差处理后, MOPITT 和 MLS CO 的相关性 得到了提高; MOPITT CO 在低纬度存在约 35 ppb 的全球性系统性偏差。

(3) 结合 CALIOP 云 层 数 据 对 MOPITT 和 MLS CO 差异原因进行分析,可见 200 hPa 高度上 CO 高值区的形成与旺盛的对流有关。这一结果需 要与模式模拟研究相互验证。

致谢 本文的卫星CO数据和云层数据均由美国NASA的相关数据服务网站提供: OLR数据来自于NOAA的相关数据网站。

参考文献 (References)

- Bittle C R, Logan M J, Prager B G. 1981. A procedure for identifying individual plume distributions from multiplume remote-sensing data [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 62(7): 1098– 1098.
- Crutzen P. 1973. A discussion of the chemistry of some minor constituents in the stratosphere and troposphere[J]. Pure and Applied Geophysics, 106–108(1): 1385–1399. doi:10.1007/bf00881092

Deeter M N, Martínez-Alonso S, Edwards D P, et al. 2013. Validation

of MOPITT version 5 thermal-infrared, near-infrared, and multispectral carbon monoxide profile retrievals for 2000–2011[J]. J. Geophys. Res., 118(12): 6710–6725. doi:10.1002/jgrd.50272

- Deeter M N, Martínez-Alonso S, Gatti L V, et al. 2016. Validation and analysis of MOPITT CO observations of the Amazon basin[J]. Atmos. Meas. Tech., 9(8): 3999-4012. doi:10.5194/amt-9-3999-2016
- Duncan B N, Logan J A, Bey I, et al. 2007. Global budget of CO, 1988-1997: Source estimates and validation with a global model[J]. J. Geophys. Res., 112(D22) doi:10.1029/2007JD008459
- Emmons L K, Deeter M N, Gille J C, et al. 2004. Validation of measurements of pollution in the troposphere (MOPITT) CO retrievals with aircraft in situ profiles[J]. J. Geophys. Res., 109(D3): D03309. doi:10.1029/2003JD004101.
- Emmons L K, Pfister G G, Edwards D P, et al. 2007. Measurements of pollution in the troposphere (MOPITT) validation exercises during summer 2004 field campaigns over North America[J]. J. Geophys. Res., 112(D12): D12S02. doi:10.1029/2006JD007833
- Emmons L K, Edwards D P, Deeter M N, et al. 2009. Measurements of pollution in the troposphere (MOPITT) validation through 2006[J]. Atmos. Chem. Phys., 9(5): 1795–1803. doi: 10.5194/acp-9-1795-2009
- Fortems-Cheiney A, Chevallier F, Pison I, et al. 2011. Ten years of CO emissions as seen from measurements of pollution in the troposphere (MOPITT) [J]. J. Geophys. Res., 116(D5): D05304. doi: 10.1029/ 2010JD014416.
- Granier C, Pétron G, Müller J F, et al. 2000. The impact of natural and anthropogenic hydrocarbons on the tropospheric budget of carbon monoxide[J]. Atmospheric Environment, 34(29–30): 5255–5270. doi: 10.1016/S1352-2310(00)00299-5
- Gratz L E, Jaffe D A, Hee J R. 2015. Causes of increasing ozone and decreasing carbon monoxide in springtime at the Mt. Bachelor Observatory from 2004 to 2013[J]. Atmospheric Environment, 109: 323–330. doi:10.1016/j.atmosenv.2014.05.076
- Holloway T, Levy II H, Kasibhatla P. 2000. Global distribution of carbon monoxide[J]. J. Geophys. Res., 105(D10): 12123–12147. doi: 10.1029/1999JD901173.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M]. Forster P V, Ramaswamy P, Artax T oet al., Eds. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA Cambridge University Press, 73.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: the Physical Science Basis[M]. Stocker T F, Qin D H, Plattne G K ret al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 127.
- Khalil M A, Rasmussen R A. 1988. Carbon monoxide in an urban

environment: Application of a receptor model for source apportionment[J]. Japca-the International Journal of Air Pollution Control and Hazardous Waste Management, 38(7): 901–906. doi:10. 1080/08940630.1988.10466430.

- Khalil M A K, Rasmussen R A, Moraes F. 1993. Atmospheric methane at Cape Meares: Analysis of a high-resolution data base and its environmental implications[J]. J. Geophys. Res., 98(D8): 14753– 14770. doi:10.1029/93jd01197.
- Martínez-Alonso S, Deeter M N, Worden H M, et al. 2014. Comparison of upper tropospheric carbon monoxide from MOPITT, ACE-FTS, and HIPPO-QCLS[J]. J. Geophys. Res., 119(24): 14144– 14164. doi:10.1002/2014jd022397.
- Novelli P C, Collins Jr. J E, Myers R C, et al. 1994. Reevaluation of the NOAA/CMDL carbon monoxide reference scale and comparisons with CO reference gases at NASA-Langley and the Fraunhofer Institut[J]. J. Geophys. Res., 99(D6): 12833–12839. doi: 10.1029/ 94jd00314.
- Novelli P C, Masarie K A, Lang P M. 1998. Distributions and recent changes of carbon monoxide in the lower troposphere[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 103(D15): 19015–19033. doi: 10.1029/98jd01366.
- Novelli P C, Masarie K A, Lang P M, et al. 2003. Reanalysis of tropospheric CO trends: Effects of the 1997–1998 wildfires[J]. J. Geophys. Res., 108(D15) doi:10.1029/2002JD003031.
- Petrenko V V, Martinerie P, Novelli P, et al. 2013. A 60-yr record of atmospheric carbon monoxide reconstructed from Greenland firm air [J]. Atmos. Chem. Phys., 13(15): 7567–7585. doi: 10.5194/acp-13-7567-2013.
- Strode S A, Worden H M, Damon M, et al. 2016. Interpreting spacebased trends in carbon monoxide with multiple models[J]. Atmos. Chem. Phys., 16: 7285–7294.
- Thompson A M, Hogan K B, Hoffman J S. 1992. Methane reductions: Implications for global warming and atmospheric chemical change [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 26(14): 2665–2668. doi:10.1016/0960-1686(92)90118-5.
- Wilson W E, Merryman E L, Levy A, et al. 1971. Aerosol formation in photochemical smog[J]. Journal of the Air Pollution Control Association, 21(3): 128–132. doi:10.1080/00022470.1971.10469508.
- Worden H M, Deeter M N, Frankenberg C, et al. 2013. Decadal record of satellite carbon monoxide observations[J]. Atmos. Chem. Phys., 13(2): 837–850. doi:10.5194/acp-13-837-2013.
- Zander R, Demoulin P, Ehhalt D H, et al. 1989. Secular increase of the total vertical column abundance of carbon monoxide above central Europe since 1950[J]. J. Geophys. Res., 94(D8): 11021–11028. doi: 10.1029/jd094id08p11021.