

# 卫星遥感监测全球和中国区域大气CO变化特征

张晔萍, 张兴赢, 高玲

中国气象局国家卫星气象中心, 北京 100081

**摘要** 利用2000年3月—2014年12月TERRA/MOPITT CO柱总量数据,研究了全球及中国区域大气CO柱总量的时空变化特征。分析表明,北半球大气CO柱总量显著高于南半球。中国东部是全球CO高值区,青藏高原、格陵兰岛、南美洲西部沿海安第斯山脉为全球CO低值区。CO柱总量在全球范围内表现出显著的季节变化,北半球CO含量在北半球春季最高,北半球冬季达到最低;南半球CO含量在南半球春季最高,南半球秋季达到最低。在月时间尺度上呈现出规律性波动,高值月份分别出现在3—4月、9—10月,低值时段分别出现在7月和1月。中国区域CO柱总量呈东高西低的阶梯状分布,东部的高值区主要分布在河北南部、山东西部、河南东部。中国区域CO柱总量在春季最高,南方地区在夏季达到最低值;北方地区在秋季达到最低值。对全球和中国区域CO含量长时间序列分析显示,2011—2014最近4年全球及中国区域大气CO柱总量呈下降趋势。中国东部沿海经济区和南部沿海经济区的年下降速率在1%左右,大西北经济区下降幅度最小。

**关键词** 卫星遥感;MOPITT;CO柱总量

**中图分类号** P407

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.17.005

## Variation characteristics of carbon monoxide distribution in global and China-based regional scales from satellite remote sensing data

ZHANG Yeping, ZHANG Xingying, GAO Ling

National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

**Abstract** With the monthly data of the TERRA/MOPITT CO column from March 2000 to December 2014, the temporal and spatial distributions and the change of the carbon monoxide content in atmosphere in the global and China-based regions are analyzed. It is shown that the CO column in the northern hemisphere is significantly larger than that in the southern hemisphere. The east China is the highest value zone of CO content over the whole world, meanwhile, the Qinghai-Tibet Plateau, the Greenland, and the Andes along the coast of the west of South America are the low value areas for the CO column. The temporal distribution of the global CO column sees a regular pattern of seasonal fluctuations, the CO column in the northern hemisphere reaches the peak in spring of the northern hemisphere and falls down to the lowest value in winter of the northern hemisphere. Similarly, the CO column in the southern hemisphere ascends to the peak in spring of the southern hemisphere and descends to the lowest value in winter of the northern hemisphere. One sees a regular pattern of monthly variation for Global CO column, with two periods of the highest and the lowest CO columns, respectively. The highest value of CO column appears from March to April and from September to October. The lowest value appears in July and January. The CO column in China also sees a significant character of spatial and temporal distributions, the CO column in the east of China is much higher than that in the west of China. The high value areas of the CO column in the east of China mainly locate in the south of Hebei Province, the west of Shandong Province and the east of Henan

收稿日期:2015-06-18;修回日期:2015-07-14

基金项目:北京市科技计划项目(Z111100067311053);中国气象局公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106045);国家科技支撑计划项目(2014BAC16B01)

作者简介:张晔萍,高级工程师,研究方向为气象卫星遥感应用,电子信箱:zhangyeping@cma.gov.cn;张兴赢(通信作者),研究员,研究方向为卫星大气成分遥感及其应用,电子信箱:zxy@cma.gov.cn

引用格式:张晔萍,张兴赢,高玲.卫星遥感监测全球和中国区域大气CO变化特征[J].科技导报,2015,33(17):52-62.

Province. The period of the highest CO total column in China is spring, however, the periods of the lowest value of CO total column are asynchronous in the south of China and the north of China. The lowest value in the south of China occurs in summer and the lowest value in the north of China occurs in autumn. The long-term temporal change of the CO column in the global and China-based regions are also analyzed. It is demonstrated that the CO columns in the global scale and in China since 2011 are generally in a descending trend. Among the eight economic zones of China, the descending trends of the coastal economic zone in the east of China and the south of China are significant, and the rate is about 1% per year, the economic zone in the northwest of China has the smallest decreasing rate.

**Keywords** satellite remote sensing; MOPITT; CO column amount

CO是全球碳循环中重要的中介气体,仅次于CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>,是大气中含碳量第3的成分,也是大气对流层中的污染气体。对流层CO主要来自生物质和化石燃料的不完全燃烧以及碳氢化合物的氧化,而它的汇最主要是被OH自由基氧化成CO<sub>2</sub>,此外还有一部分耗散到平流层中,另一部分被土壤生物氧化。CO与对流层OH自由基发生反应,消耗大约60%的OH自由基,可导致对流层大气氧化性下降,阻碍CH<sub>4</sub>等气体的氧化,间接影响了大气中CH<sub>4</sub>含量和生命时间,继而导致其他污染物,尤其是一些短寿命污染物化学寿命的增长并更多地进入平流层,对平流层大气环境产生影响<sup>[1]</sup>;同时,在对流层和下平流层中CO是参与O<sub>3</sub>生成反应的重要前体物之一<sup>[2]</sup>。CO在气候系统中也具有特殊的作用,CO导致大气CH<sub>4</sub>和O<sub>3</sub>含量的变化,具有间接的辐射强迫效应<sup>[3]</sup>。此外,CO在大气中较长的化学寿命(几周至两个月)和较大的含量梯度,使之成为研究大气运动的极好示踪物,在对流层,CO可用来研究污染的扩散和输送过程。因此,对CO的研究具有多方面意义:CO是大气环境和大气污染的关注对象,是研究大气运动极好的示踪物,它在地球大气化学-气候体系中具有独特的作用。

随着社会经济发展和人类活动的加剧,大气中CO含量和分布特征也随之发生改变,进而影响大气环境和气候系统,传统的地基观测在站点数量和分布上有局限性,难以应用于CO全球分布、大气传输等方面的研究,而卫星观测极大地提高了对CO排放源和分布规律的了解,卫星资料成为研究、监测全球CO时空分布的重要手段。

国外开展了较多的CO卫星遥感工作,1999年发射的美国EOS/TERRA卫星上搭载的MOPITT(measurement of pollution in the troposphere)传感器仍在轨进行CO的遥感监测。搭载于欧洲太空局ENVISAT卫星的SCIAMACHY(scanning imaging absorption spectrometer for atmospheric chartography)传感器采用近红外通道观测反演得到大气CO柱总量,美国EOS/AQUA卫星上的AIRS(atmospheric infrared sounder)、Aura卫星上的TES(tropospheric emission spectrometer)也提供全球CO实时监测数据,2006年发射的Metop卫星上的IASI(infrared atmospheric sounding interferometer)数据也在进行CO的廓线反演研究。

国内外学者应用卫星遥感数据对全球及中国的CO总量和分布特征进行了大量研究。Streets等<sup>[4]</sup>利用卫星遥感数据

订正了亚洲CO调查污染源的排放量,Worden等<sup>[5]</sup>通过2000—2011年卫星CO观测资料的研究表明,北半球大气CO柱总量以每年约1%的速率递减,南半球也存在着略逊于北半球的逐年递减。秦世广等<sup>[6]</sup>利用ATSR卫星火点资料根据模式分析了欧亚大陆生物质燃烧排放的时空分布特征,并结合MOPITT CO反演数据分析了生物质燃烧和排放输送对中国的影响。赵春生等<sup>[7]</sup>利用TERRA/MOPITT 2000—2004年的CO数据分析了全球CO时空分布特征,与瓦里关的地基数据进行了对比分析。林云萍等<sup>[8]</sup>结合MOPITT卫星观测资料和Horowitz源排放清单,利用MOZART模拟大气中CO含量变化的物理化学过程,提出新的计算CO源排放的方法。白文广等<sup>[9]</sup>对MOPITT和SCIAMACHY两种传感器反演的CO柱总量进行对比和验证,并使用MOPITT数据分析了2002—2009年中国CO柱总量的时空分布规律及其成因。Li等<sup>[10]</sup>利用2000—2010年MOPITT CO产品和地基观测数据分析了北京及其周边的CO污染特征。尉鹏等<sup>[11]</sup>通过分析2004—2010年AIRS的CO数据和地基数据,研究了中国各区域CO的时空特征和CO分布的汇聚特征,结合气象观测资料,分析了中国CO汇聚带形成的主要背景场。

CO在大气中的含量是反映区域环境状况的重要指标。中国作为全球人口大国和经济发展最迅猛的区域,人类活动的排放对大气CO含量必然产生显著作用,因此准确认识全球以及中国地区CO时空分布与变化规律对大气环境研究以及大气污染治理至关重要。本文利用MOPITT(TERRA) 2000—2014年资料对全球及中国区域CO时空分布及变化特征进行分析。

## 1 数据来源

研究使用的CO资料来自搭载于EOS/TERRA卫星的MOPITT仪器,该卫星是太阳同步卫星,于1999年12月发射,2000年3月开始例行性观测,采用天底观测的方式工作,约3 d可覆盖一次全球。MOPITT是第一个全面测量全球CO和CH<sub>4</sub>总量的时间和空间变化的仪器。MOPITT根据气体相关放射性测量学原理,测量对流层的CO体积混合比、CO与CH<sub>4</sub>柱总量,空间分辨率是22 km×22 km。MOPITT对垂直于卫星轨迹方向的地面进行横向扫描,测量3个波长的光谱,采用热红外波段4.7 μm的发射辐射,探测CO在对流层中的垂直分布情况,使用短波太阳辐射通道2.3和2.2 μm探测对流层中

CO 和 CH<sub>4</sub> 柱总量<sup>[12]</sup>。MOPITT 目前能够提供的 CO 数据主要是柱总量和 9 层垂直廓线混合比数据(900~100 hPa, 每 100 hPa 一个反演层次)<sup>[13]</sup>。

国内外开展了较多关于 MOPITT CO 反演产品的质量验证工作。2001—2006 年 MOPITT 反演结果与地面、飞机观测的比较显示:CO 柱总量反演结果偏差控制在 20% 以内<sup>[14]</sup>。白文广等<sup>[9]</sup>比较了 2007—2008 年 MOPITT CO 柱总量和 4 个本底站观测结果,分析表明 MOPITT CO 柱总量反演结果具有很好的可靠性,可用于区域 CO 时空分布研究。本文使用的数据是 MOPITT 第 6 版 TERRA CO 柱总量反演 3 级产品,从 NASA 官方网站 [https://eosweb.larc.nasa.gov/project/mopitt/mop03tm\\_table](https://eosweb.larc.nasa.gov/project/mopitt/mop03tm_table) 下载,数据时段 2000 年 3 月—2014 年 12 月,1°×1° 网格 HDF 数据。由于仪器原因, MOPITT 在 2001 年 6—7 月、2009 年 8—9 月缺失。

## 2 分析与讨论

### 2.1 全球 CO 柱总量变化分析

利用 2000 年 3 月—2014 年 12 月的数据对全球 CO 柱总量年、季节、月及长时间序列变化特征进行分析。

季节划分:3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月—次年 2 月为冬季。

为了探讨全球大气 CO 柱总量分布空间差异,根据纬度划分为以下 5 个区域进行分析:北半球 0°~90°N,北半球中高纬 23.5°N~90°N,南半球 0°~90°S,南半球中高纬 23.5°S~90°S,低纬度 23.5°S~23.5°N。

1) 全球 CO 柱总量年分布及时间变化趋势。图 1 是 2000—2014 年全球多年平均 CO 柱总量图。由图 1(a) 可见,北半球大气 CO 含量显著高于南半球。陆地区域的 CO 含量高于海洋,南半球海洋区域 CO 总体较低。全球陆地区域存在几个高值区:中国东部、东南亚、西非(赤道非洲)、欧洲大

陆、南美洲北部、北美洲中东部,其中中国东部地区 CO 柱总量明显高于其他区域。陆地区域 CO 低值区包括青藏高原、蒙古国、中亚、格陵兰、北美洲西海岸、南美洲西海岸和大洋洲,其中青藏高原、格陵兰岛、南美洲东海岸 CO 柱总量为显著的低值中心。

全球范围内,对流层 CO 柱总量分布与人口密度和地形(海拔)密切相关,中国东部是全球 CO 高值区,是世界人口密度最高的区域,人类活动的排放对 CO 含量影响较为显著,而 CO 低值中心则分布在人口稀少、海拔较高的地区,如青藏高原、纵横南北美洲的科迪勒拉山系(南美西部安第斯山脉高度多在 3000 m 以上),低值中心主要与地形或海拔相关,其原因在于 CO 主要集中在对流层,高海拔一方面使得气体柱含量低,另一方面高海拔地区通常是低人口密度区,人类活动影响小,人为排放少。由此可见,低层大气 CO 含量主要受地表排放尤其是人为排放影响,而北半球是人类活动的密集区,来自地表排放的 CO 显著高于南半球。

通过对比全球及不同纬度带的 CO 柱总量多年平均值可见,2000—2014 年全球平均 CO 柱总量为  $1.447 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>,北半球中高纬地区大气 CO 柱总量最高,达到  $1.835 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>,低纬地区次之、南半球中高纬地区最低,分别为  $1.648 \times 10^{18}$  和  $0.994 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>;中国区域的多年平均值为  $1.975 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>,高于北半球中高纬地区的平均值,反映出中国是全球 CO 分布的显著高值区。

利用 2000—2014 年 CO 柱总量各年平均值与时间进行线性拟合,分析全球 CO 柱总量时间变化趋势,结果表明(图 1(b)):全球绝大部分区域表现出微弱下降的趋势,大部分区域下降幅度低于  $0.25 \times 10^{17}$  分子数/cm<sup>2</sup>,中国东部、南美洲北部(巴西西部)下降趋势相对明显,下降幅度  $0.25 \times 10^{17} \sim 0.5 \times 10^{17}$  分子数/cm<sup>2</sup>;仅东北亚、中国西部、中亚、非洲中部、南北美洲西海岸呈现微弱的上升趋势。

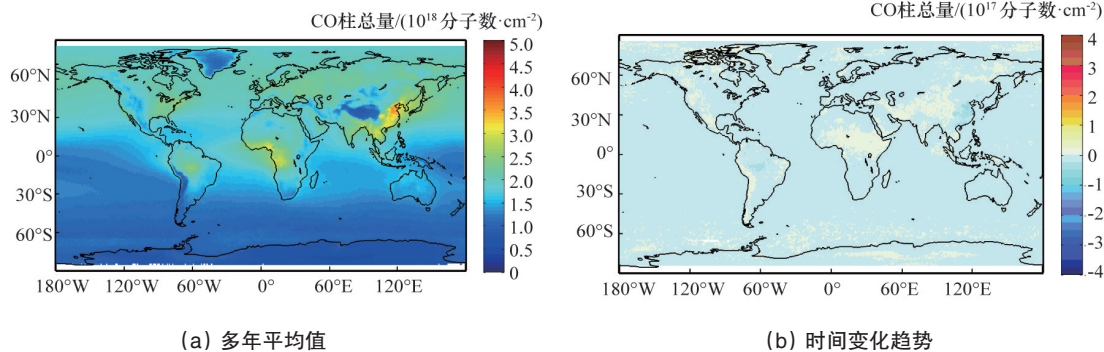


图 1 全球 CO 柱总量年分布及时间变化趋势(2000—2014 年)

Fig. 1 Multi-year average and temporal change trends of global CO column (2000–2014)

2) 全球 CO 柱总量季节分布特征及时间变化趋势。分析近 15 年 4 个季节全球 CO 柱总量平均值(图 2(a)~(d)) 可见,CO 柱总量在全球范围内表现出显著季节变化,北半球尤其是

中高纬陆地区域,对流层 CO 柱总量春季最高,夏秋季持续下降,至冬季北半球陆地和海域 CO 柱总量上升,而南半球对流层 CO 含量秋季(南半球春季)最高,春季(南半球秋季)最低。

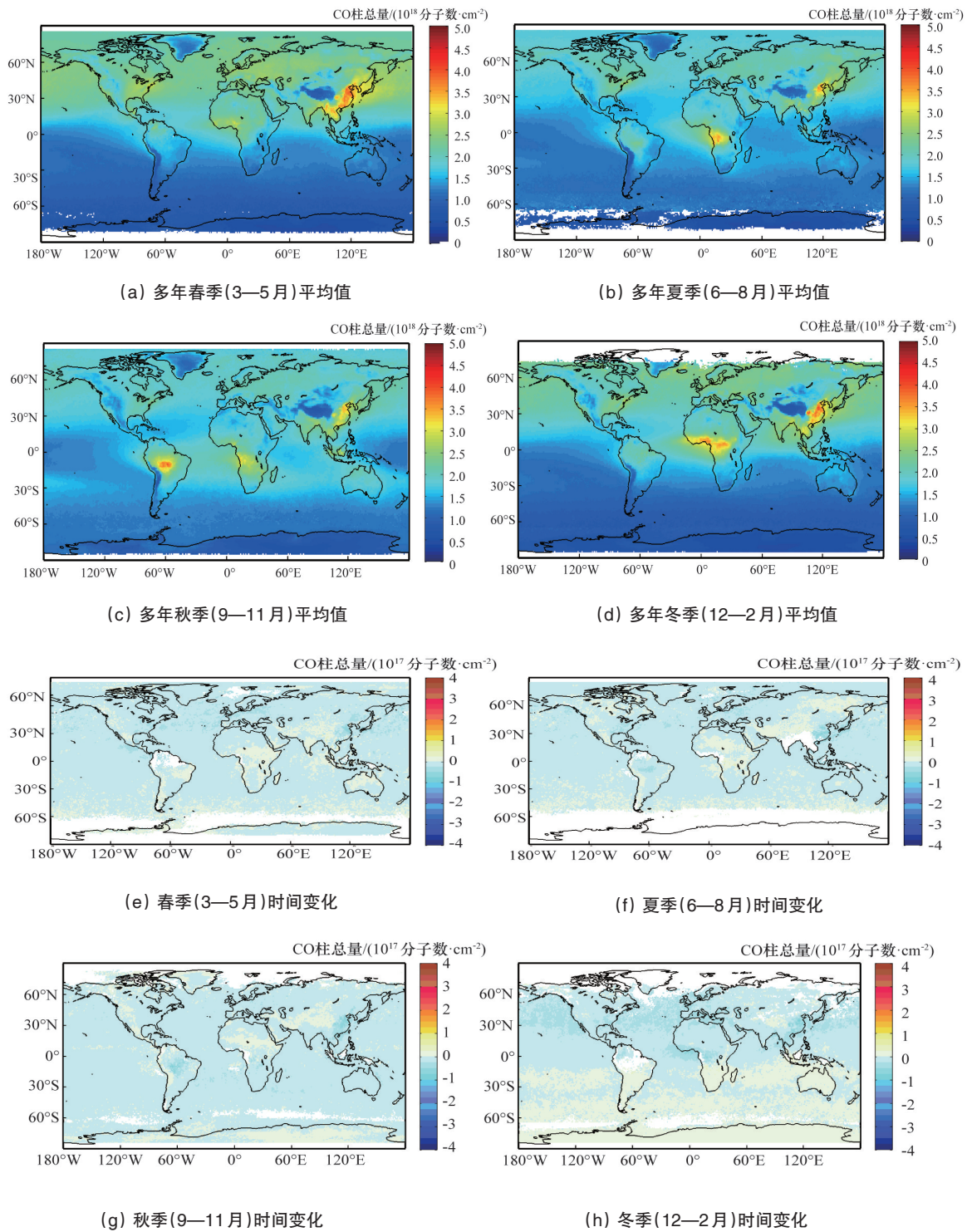


图2 全球CO柱总量季节分布特征及时间变化趋势(2000—2014年)

Fig. 2 Seasonal distribution characteristics and temporal change trends of the global CO column (2000–2014)

春季,北半球绝大部分区域(包括陆地和海洋)大气CO柱总量较高,大部分区域CO柱总量在 $2.5 \times 10^{18} \sim 3 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>,南半球CO柱总量较低。中国东部及附近海域、东南亚地区明显高于其他地区,这一高值区CO柱总量达 $3.5 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>,北美洲西海岸存在相对低值区。夏季,北半球大

陆区域CO柱总量明显下降,非洲中北部以及北半球中低纬的海洋上CO柱总量下降最为明显,中国东部高值区范围明显缩小且含量下降,高值范围仅存在于华北黄淮一带。南半球洋面和陆地上的CO柱总量有所上升,非洲中南部和南美洲北部(赤道地区)CO含量明显上升,尤其在赤道非洲(刚果

盆地)CO柱总量达到 $3 \times 10^{18} \sim 3.5 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>。秋季,北半球大陆区域CO柱总量继续下降,中国东部高值区范围较夏季向南延伸,范围和程度低于春季,南亚和东南亚地区与夏季相比变化不大。南半球洋面和陆地上的CO柱总量继续上升,大洋洲、印尼群岛CO柱总量分别上升到 $2 \times 10^{18}$ 和 $2.5 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>左右,非洲中南部、南美洲中部上升明显,刚果盆地的高值区下降,但范围扩大向南部扩展,南美洲中北部高值区强度加大,CO柱总量上升至 $3.5 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>左右。冬季,北半球大陆和洋面上空CO柱总量开始回升,中国东部高值区范围向西向南扩展。南半球的CO柱总量下降,非洲中南部的CO柱总量高值区向北移动到赤道非洲一带,CO柱总量超过 $3 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>。

CO柱总量分布存在季节变化的原因在于CO和OH自由基反应是CO最主要的汇之一,OH自由基主要来自O<sub>3</sub>的光解并伴随着水汽的参与,夏季高温、高湿和较强的光照易于产生OH自由基,造成CO消耗量较大;CH<sub>4</sub>氧化是CO的一个重要来源,CH<sub>4</sub>在夏季处于最小值,减少了CO的转化;而冬季温度低,水汽含量少,紫外辐射减弱,OH自由基相对较少,利于CO的积累,导致了春季北半球CO含量最高。南半球在季节上与北半球相反,CO高值时段出现在秋季,南半球CO高值时段和高值区分布与生物质燃烧密切相关,该时段在南美中部亚马逊河流域以及南部非洲以农业为主的区域正好是农耕季节,大面积生物质燃烧产生大量CO,因此生物质燃烧可能是秋季南美洲中北部和赤道非洲地区对流层CO柱总量较高的主要原因。

对近15年四季的对流层CO柱总量变化趋势分析表明(图2(e)~(h)):全球绝大部分地区表现出CO柱总量微弱下降的趋势。春季,中国西部、南亚、中亚、非洲中部(赤道两侧)、南美洲东北部和西海岸、北美洲西海岸部分地区、大洋洲中部和北部微弱上升;中国东部、欧洲西北部、北美洲东南部下降幅度在 $0.25 \times 10^{17} \sim 0.5 \times 10^{17}$  分子数/cm<sup>2</sup>。夏季,俄罗斯远东地区、中国西部和中亚、西亚部分地区、非洲中部和北部、南美洲西海岸、北美洲北部以及西海岸呈现微弱上升趋势,中国东部、南美洲赤道以南部分区域下降幅度较为明显。秋季,中国东部、南美洲赤道以南地区下降幅度略大;青藏高原、中亚、非洲赤道以北地区、格陵兰边缘、北美洲西海岸微弱上升。冬季在南半球绝大部分地区呈现微弱上升的趋势,北半球主要为轻微上升,中国东部、东南亚、赤道非洲、北非、北大西洋下降幅度在 $0.25 \times 10^{17} \sim 0.5 \times 10^{17}$  分子数/cm<sup>2</sup>。

3) 全球CO柱总量月分布特征。通过统计全球以及北半球、北半球中高纬、南半球、南半球中高纬、低纬5个区域的CO柱总量多年的月平均值(图3),进一步分析全球不同区域大气CO柱总量在月时间尺度上的变化特征。

全球范围内,CO柱总量在年内呈现为双峰双谷的变化规律,高值月份分别出现在3—4月、9—10月,低值时段分别出现在7月和1月。低纬区域CO柱总量波动幅度比较小,1—4月下降缓慢,4—7月下降幅度增大,7月达到年内最小

值,7—10月逐渐增加,至10月达到最高值,10月份开始缓慢降低。北半球以及北半球中高纬地区,呈单峰单谷(先升后降)特征,2个分区在月时间尺度上的变化特征相似,以北半球中高纬为例,1—4月CO柱总量持续增长,4月达到最高值,此后持续下降,7—9月CO柱总量基本保持稳定,之后明显下降,至12月达到年内最低值。南半球以及南半球中高纬地区,月际的变化规律与北半球相反,1—3月CO柱总量缓慢下降,6月达到最高值,之后显著上升,10月达到最高值,年内波动幅度约0.7。

总体上,北半球中高纬CO柱总量高于全球其他区域,月际波动幅度大于其他区域。

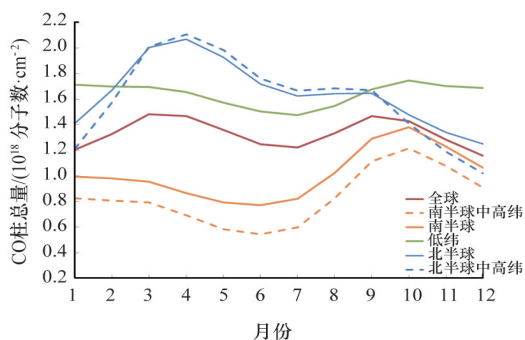


图3 全球及分区CO柱总量多年月平均值

Fig. 3 Multi-year monthly average of CO column over the world and in the four sub regions from 2000 to 2014

4) 全球CO柱总量长时间序列变化分析。利用2000年3月—2014年12月逐月的CO柱总量数据分析全球及不同区域长时间序列变化特征。图4分别为全球、低纬区域、北半球及北半球中高纬地区、南半球及南半球中高纬地区的CO含量长时间序列图。

全球范围内CO柱总量的变化以年为周期存在双峰双谷的变化规律(图4(a)),2个峰值分别出现在每年4月和9—10月,低值分别出现在6月、12月,4月的峰值明显高于9、10月的峰值,12月的低值明显低于6月、7月。这是由于南北半球峰谷变化相反且叠加所致,加上北半球大气CO柱总量明显高于南半球,因此第一个峰值明显高于第二个峰值,第一个波谷高于第二个波谷。

低纬度地区(图4(b))大部分年份在7月出现明显的低值,个别年份出现在6月。在10月—次年4月之间存在持续的高值时段。该区域最小值基本稳定在 $1.35 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>左右,最大值变化幅度较大。与中高纬地区相比,低纬度地区年内波动小于其他区域。

北半球及中高纬地区(图4(c))CO柱总量4月达到最高值,12月达到最低值,在这个下降周期内,8月会出现小的次峰值。北半球中高纬地区年内的波动大于北半球,2个区域的逐年的最大值(各年4月)接近,北半球中高纬地区的逐年最低值明显低于整个北半球。与南半球相比,北半球CO柱总量年内波动幅度大,约为南半球的2倍。

南半球及中高纬地区(图4(d))CO柱总量呈规律性波

动。南半球CO柱总量每年10月达到最高值,6月达到最低值,在这个下降周期内,1—3月会出现小的峰值,上升幅度不是很大。相对而言,每年10月最大值的变化幅度更为显著,2013年10月最大值为近15年最低。

在全球、低纬地区、北半球及中高纬地区、南半球及中高

纬地区,CO含量的时间序列变化均表现出以下的规律:2011—2014年4年度的最大值和最小值总体低于2000—2010年的对应值,反映出最近4年全球大气CO柱总量呈下降趋势。

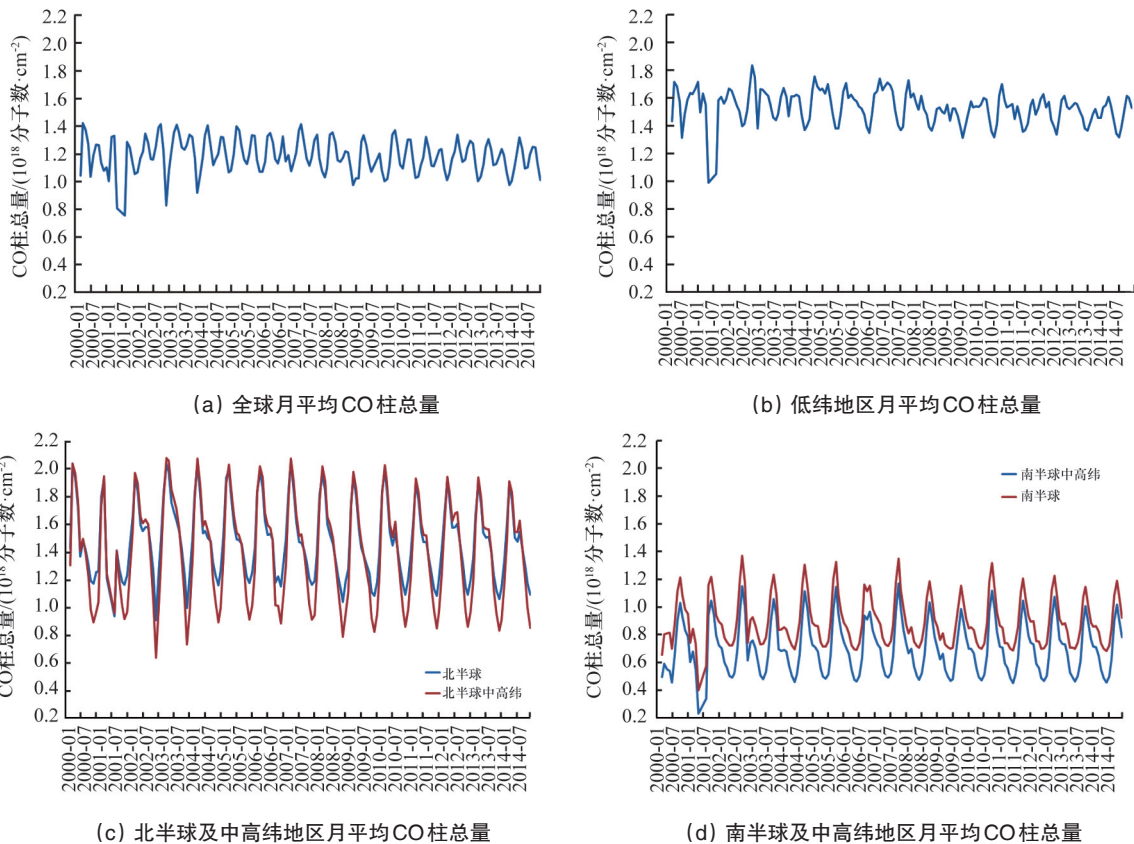


图4 全球CO柱总量长时间序列变化分析(2000年3月—2014年12月)

Fig. 4 Long-term change analysis of global CO column (from March 2000 to December 2014)

## 2.2 中国区域大气CO柱总量变化分析

利用MOPITT数据进一步分析中国区域CO柱总量时空分布特征。由于大气CO含量与经济发展水平、产业结构密切相关,本部分也分析8大经济区大气CO柱总量的时空分布规律。8大经济区采用了“十一五”社会经济发展规划的区划方案,具体为:东北综合经济区(辽宁、吉林、黑龙江)、北部沿海综合经济区(北京、天津、河北、山东)、东部沿海综合经济区(上海、江苏、浙江)、南部沿海经济区(福建、广东、海南)、黄河中游综合经济区(陕西、山西、河南、内蒙古)、长江中游综合经济区(湖北、湖南、江西、安徽)、大西南综合经济区(云南、贵州、四川、重庆、广西)、大西北综合经济区(甘肃、青海、宁夏、西藏、新疆)。

1) 中国区域CO柱总量年分布特征。图5(a)为2000—2014年中国区域CO平均柱总量分布图。由图5可见,中国区域CO柱总量分布从东部沿海至西北内陆呈明显的阶梯分布,东部和南部及四川盆地为高值区,在 $3 \times 10^{18} \sim 4 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>,中部区域在 $2 \times 10^{18} \sim 3 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>,西部地区CO

柱总量较低,总体小于 $2 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>,其中青藏高原多年平均值低于 $1.5 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>。东部的高值区主要分布在河北南部、山东西部、河南东部。

中国区域CO柱总量分布与中国人口分布、社会经济发展区域差异以及自然地理特征高度吻合。中国东部是世界人口密度最高的区域,工业发达、汽车保有量大,导致能源消耗高、CO人为排放量大,成为明显的高值区,在经济欠发达的西部,人口稀少,人为排放量小,在西部尤其是青藏高原形成了显著的低值区。

8大经济区CO柱总量多年平均值顺序:东部沿海>长江中游>南部沿海>北部沿海>东北>黄河中游>大西南>大西北,各经济区CO柱总量多年平均值分别为 $3.271 \times 10^{18}$ 、 $3.096 \times 10^{18}$ 、 $2.869 \times 10^{18}$ 、 $2.729 \times 10^{18}$ 、 $2.446 \times 10^{18}$ 、 $2.124 \times 10^{18}$ 、 $2.086 \times 10^{18}$ 、 $1.399 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>。

2) 中国区域CO柱总量季节分布特征。中国中东部的季节变化特征表现为春季最高,夏季明显降低,至秋冬季持续上升,西部在秋季达到最低值。

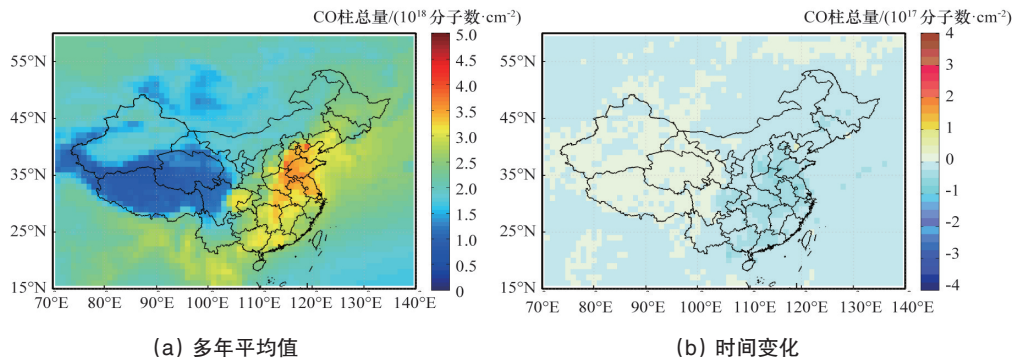


图5 中国区域CO柱总量年分布及时间变化趋势(2000—2014年)

Fig. 5 Multi-year average and temporal change trends of CO column in China (2000–2014)

分析中国区域(图6),春季中国区域的CO柱总量处于四季中的最高值,中国东部的高值区从辽宁向南至华南地区,东部海域包括渤海、黄海以及东海海域均为高值区,西侧扩展至湖北湖南以及四川盆地,CO柱总量在 $3.5 \times 10^{18} \sim 4.0 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>,青藏高原大部在 $1 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>左右;夏季,CO柱总量显著下降,中东部高值区的范围明显缩小,高

值区主要分布在河北、山东、河南东部;秋季,东部的高值区域包括四川盆地再次扩大,总体上低于春季。西部的低值区域继续向东向北扩展,西部大部分区域的CO柱总量较夏季继续降低;冬季,除青藏高原外大部分区域的CO柱总量持续上升,中东部高值区域在范围上基本接近春季,程度上略低于春季。

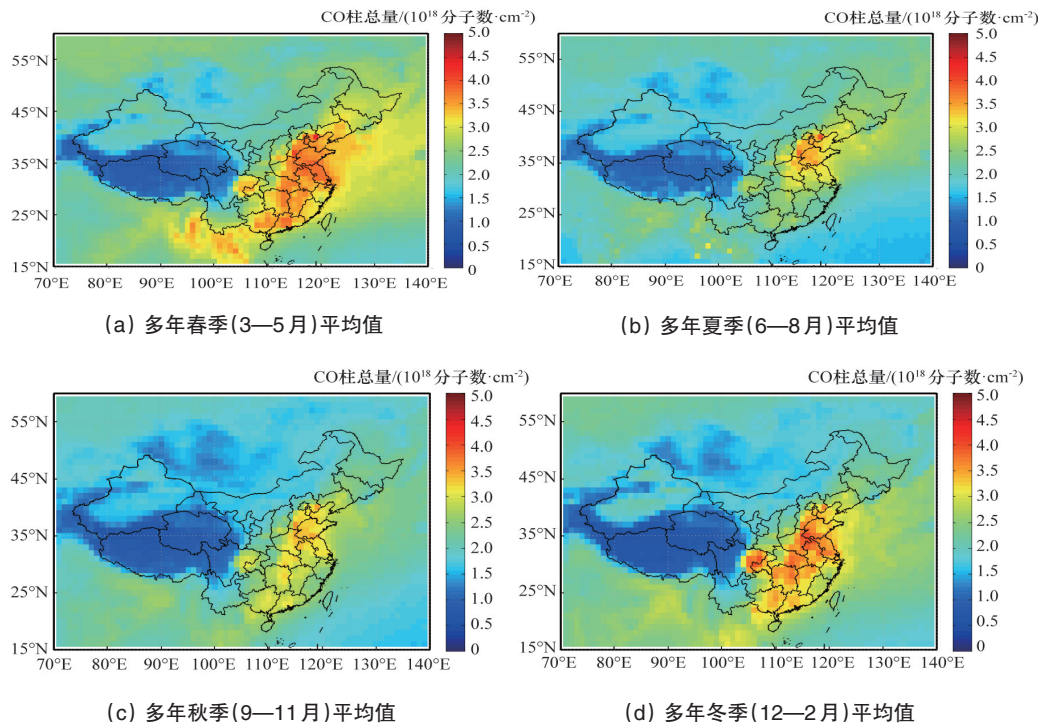


图6 中国区域CO柱总量季节分布(2000—2014年)

Fig. 6 Seasonal distribution of CO column in China (2000–2014)

中国及中国8大经济区大气CO柱总量季节变化(图7(a)):南方4个经济区东部沿海、长江中游、南部沿海和西南经济区季节变化基本同步,春季最高,夏季达到最低,秋季和冬季持续回升,区域平均值看,春季>冬季>秋季>夏季;北方4个经济区季节变化也较为相似,春季最高,夏季和秋季持续下降,冬季缓慢回升。

3) 中国区域CO柱总量月分布特征。对中国及8大经济

区近15年的CO柱总量月平均值进行分析可见(图7(b)),中国区域的最大值出现在4月,最小值出现在11月,1—4月上升,之后下降,12月开始上升。波动幅度 $0.443 \times 10^{18}$  分子数/cm<sup>2</sup>。东部沿海、南部沿海、长江中游、大西南4个区域的最大值大部分出现在3月(长江中游经济区出现在2月),最小值出现在7月。1—3月缓慢上升,5—7月下降明显,7—12月稳步上升。1—5月、10—12月东部沿海、南部沿海、长江中游3

个区域的CO柱总量普遍高于北方4个区域。北方4个经济区中,北方沿海、东北、黄河中游3个区域CO柱总量的月变化相似。最大值均出现在4月,最小值出现在11月,东北区域例外,最小值的时段在12月,北方沿海>东北>黄河中游>大西北,1—4月上升,之后下降,12月开始上升。就波动幅度而言,

北方4个经济区总体小于南方4个经济区,8大经济区CO柱总量多年月平均值波动幅度顺序:南部沿海>长江中游>东部沿海>东北>大西南>黄河中游>北部沿海>大西北。对应于月空间分布图,北方沿海、黄河中下游地区始终保持较高水平。

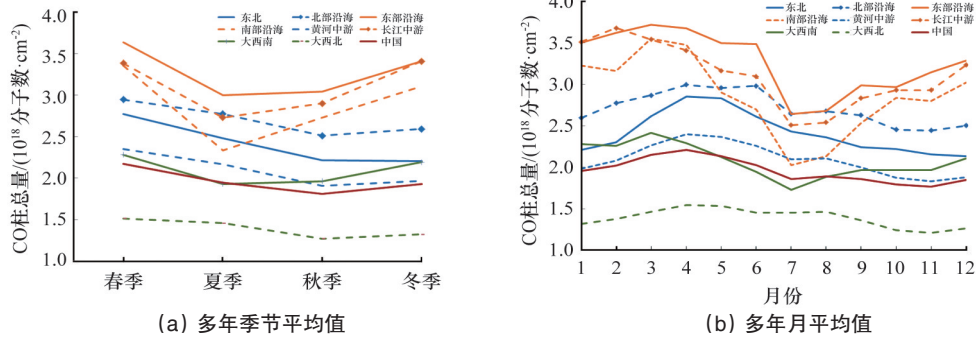


图7 中国及中国8大经济区大气CO柱总量季节变化和月变化(2000—2014年)

Fig. 7 Seasonal and monthly changes of CO column in China and eight economic zones (2000-2014)

多年逐月平均值分布图(图8)显示:1—3月,河北、山东、河南中东部、江苏、安徽、湖北大部、浙江、江西、湖南、贵州东部、福建、广东、广西以及四川盆地持续高值,且稳定上升。5月,高值区向北收缩至长江流域以北,西部边界向东收缩,在数值上也有所下降,东部高值区范围和程度持续下降;7—8月,高值区范围基本收缩至华北东南部和黄淮中部;9—11月,高值区自华北、黄淮向长江中下游以及江南、华南、四川盆地发展;12月,中东部地区CO柱总量普遍上升。

4) 中国区域CO柱总量长时间序列变化和变化趋势分析。通过对中国及8大经济区近15年的CO柱总量的逐月时间序列分析可见:中国区域的CO柱总量具有明显的双峰双谷的年周期变化特征(图9(a)),2个峰值分别出现在4月和9月,2个波谷分别出现在7月和12月,个别年份峰谷出现时间有前后1个月的波动。第1个峰值(4月)明显高于第2个峰值(9月),第1个波谷(7月)总体上CO含量高于第2个波谷(12月)。

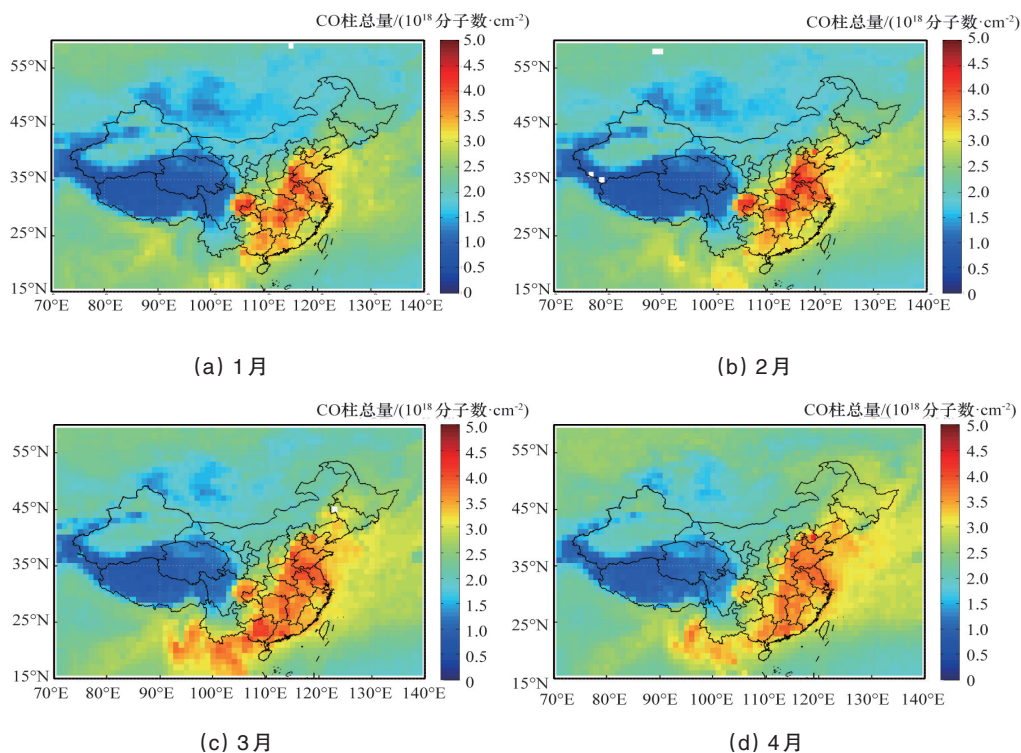


图8 中国区域CO柱总量多年月平均值(2000—2014年)

Fig. 8 Multi-year month average of CO column amount in China (2000-2014)

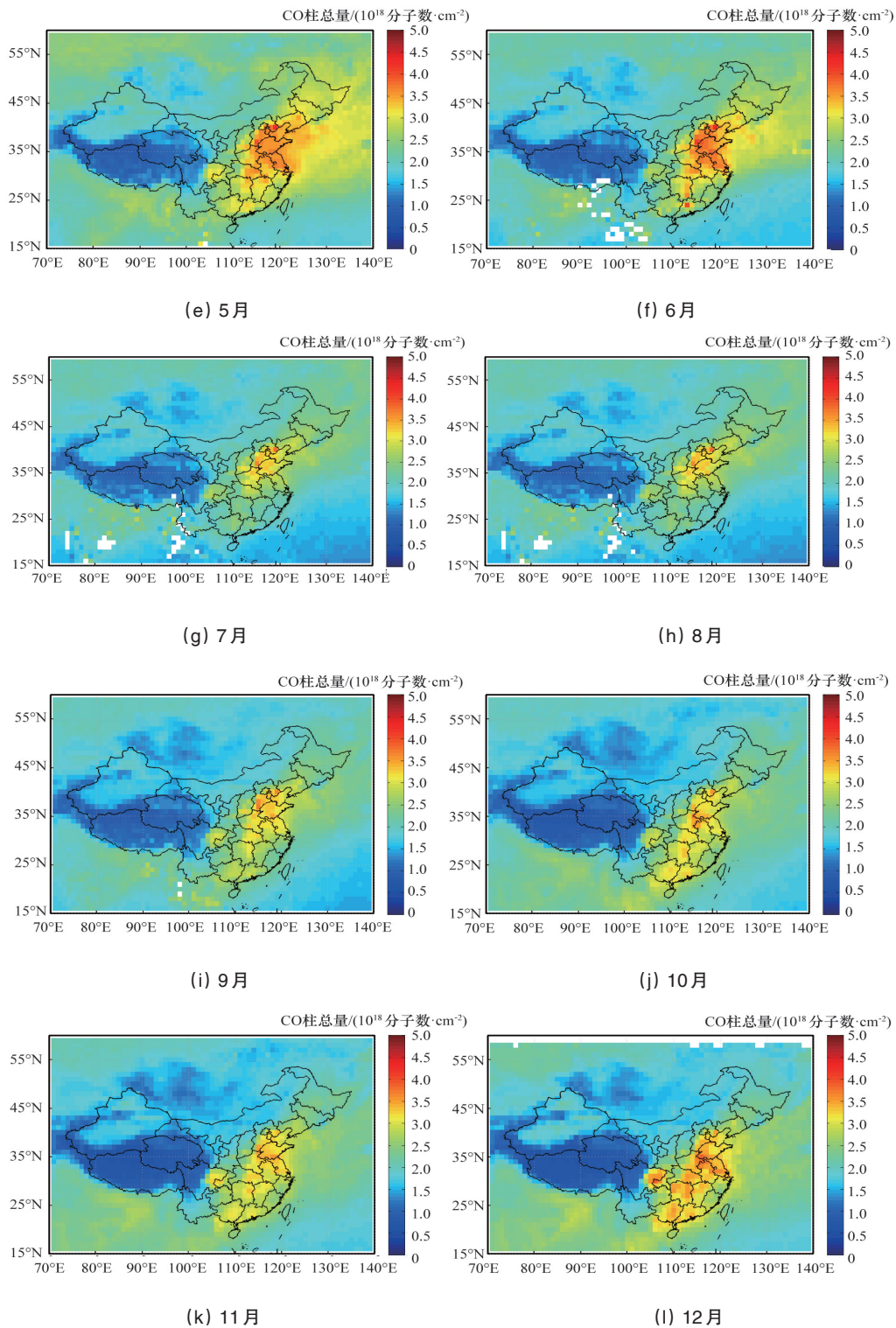


图8 中国区域CO柱总量多年月平均值(2000—2014年)(续)

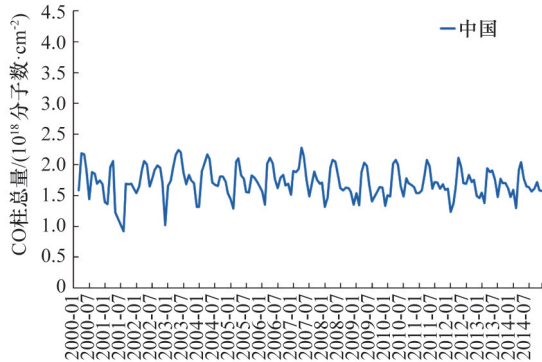
Fig. 8 Multi-year monthly average of CO column in China (2000-2014) (Continued)

东北、北部沿海、黄河中游、大西北4个经济区的CO柱总量的长时间序列变化特征较为一致(图9(b)),而东部沿海、南部沿海、长江中游、大西南四个经济区则具有相似的变化模式(图9(c)),说明南方地区和北方地区长时间序列变化趋势上有所不同。北方4个经济区CO柱总量通常在4月达到峰

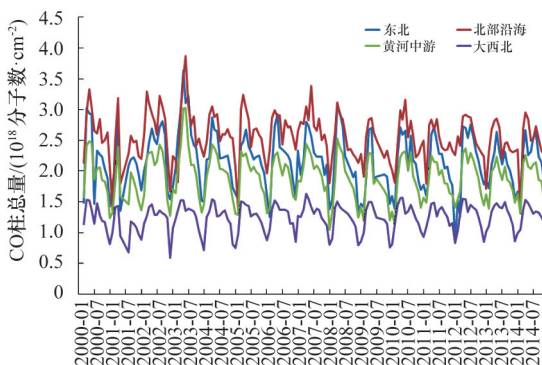
值,12月或1月达到最低值,7月左右存在小的波谷,8或9月出现小的峰值。2013年4月是东北、北部沿海、黄河中游3个区域近15年CO柱总量的最大值。相对于北方区域,南方4个经济区的年内波动性更为显著,南方4个经济区CO柱总量的高值时段主要集中在3或4月,但年内的低值时段出现在7

月。2010年之后上述区域的峰值均有下降,进一步说明最近4年中国区域CO柱总量呈下降趋势。

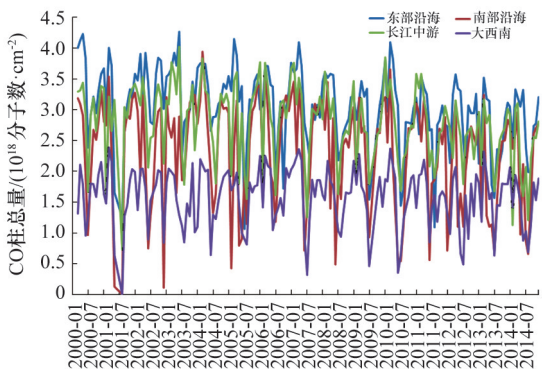
对2000—2014年逐年CO柱总量的平均值进行线性拟合,分析中国区域CO含量时间变化趋势,结果显示:近15年,全国及8大经济区CO柱总量均表现为下降趋势,但下降幅度不大。中国区域的年变化率为0.475%,东部沿海经济区、长江中游经济区较其他经济区下降幅度略大一些,超过1.15%左右,大西北经济区变化幅度最小为0.15%,全国及8大经济区CO柱总量下降趋势可能与能源利用效率提高有关。



(a) 中国区域多年逐月平均值



(b) 中国北方4个经济区多年逐月平均值



(c) 中国南方4个经济区多年逐月平均值

图9 中国及中国8大经济区CO柱总量长时间序列变化分析  
(2000年3月—2014年12月)

Fig. 9 Long-term change analysis of CO column in China and eight economic zones (March 2000—December 2014)

### 3 结论

通过分析近15年MOPITT CO数据,对全球及中国区域大气CO柱总量的时间和空间分布规律进行了研究。

1) 全球范围内,对流层CO柱总量分布与人口密度和地形密切相关,受人类活动影响,北半球大气CO柱总量显著高于南半球。陆地区域CO含量高于海洋,南半球海洋区域CO总体较低。中国东部是世界上人口密度最高的地区,该地区是全球CO典型的高值区,而青藏高原、格陵兰岛、南美洲西部沿海安第斯山脉等高海拔或人口稀少的地区为全球CO低值区。对流层CO分布与人口密度分布高度一致,表明CO含量分布与人类经济活动密切相关。

2) CO柱总量在全球范围内表现出显著的季节变化,南北半球CO柱总量分别在各自半球的春季达到最高值,北半球在北半球冬季达到冬季最低,南半球在南半球秋季最低。

3) 全球范围内,CO柱总量以年为周期在月时间尺度上规律性波动,高值月份分别出现在3—4月、9—10月,低值时段分别出现在7月和1月。每年10月南北半球CO柱总量达到最高值,6月达到最低值,1—3月出现小的峰值;4月,北半球CO柱总量达到最高值,12月达到最低值,8月会出现小的次峰值。2011—2014最近4年全球大气CO柱总量呈下降趋势。

4) 中国区域CO柱总量呈东高西低的阶梯状分布,东部的高值区主要分布在河北南部、山东西部、河南东部。8大经济区CO柱总量多年平均值顺序:东部沿海>长江中游>南部沿海>北部沿海>东北>黄河中游>大西南>大西北,进一步说明人类经济活动的强度显著影响对流层大气CO含量。

5) 中国区域CO柱总量表现出明显的季节特征,春季最高,但南方4个经济区在夏季达到最低值;北方4个经济区在秋季达到最低值。

6) 对中国及8大经济区时间变化趋势分析表明:近15年,全国及各经济区CO含量呈下降趋势,但下降幅度不大,总体而言,东部沿海经济区和南部沿海经济区的年变化率在1%左右。

本文对近15年全球及中国区域大气CO柱总量的时、空间分布特征进行了重点分析,并分析了其可能的成因,取得了有意义的结果,但还存在一些不足,有很多问题值得继续研究和探讨:1) 本文仅初步得出大气CO含量与人类经济活动密切相关的结论,针对CO含量高值区,尤其是中国东部,需要继续深入研究人类经济活动如何影响CO时空分布;2) 本研究表明,最近4年全球大气CO柱总量呈下降趋势,在今后的工作中,需要继续研究分析其可能的成因。

致谢: [https://eosweb.larc.nasa.gov/project/mopitt/mop03tm\\_table](https://eosweb.larc.nasa.gov/project/mopitt/mop03tm_table) 网站提供CO数据。

参考文献 (References)

- [1] Salawitch R J, Weisenstein D K, Kovalenko L J, et al. Sensitivity of ozone to bromine in the lower stratosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, doi: 10.1029/2004GL021504.
- [2] Seiler W, Fishman J. The distribution of carbon monoxide and ozone in the free troposphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(C8): 7255–7265.
- [3] Daniel J S, Solomon S. On the climate forcing of carbon monoxide[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(D11): 13249–13260.
- [4] Streets G, Zhang Q, Wang L, et al. Revisiting China's CO emissions after the transport and chemical evolution over the Pacific (TRACE-P) mission: Synthesis of inventories, atmospheric modeling, and observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(D14): 14306–14322.
- [5] Worden H M, Deeter M N, Fraaikeberg C, et al. Decadal record of satellite carbon monoxide observations[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13: 837–850.
- [6] 秦世广, 丁爱军, 王韬. 欧亚大陆生物质燃烧气团的输送特征及对对中国的影响[J]. *中国环境科学*, 2006, 26(6): 641–645.  
Qin Shiguang, Ding Aijun, Wang Tao. Transport pattern of biomass burning air masses in Eurasia and the impacts on China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(6): 641–645.
- [7] 赵春生, 方圆, 汤洁, 等. MOPITT 观测的 CO 分布规律及与瓦里关地面观测结果的比较[J]. *应用气象学报*, 2007, 18(1): 36–42.  
Zhao Chunsheng, Fang Yuanyuan, Tang Jie, et al. Distribution of carbon monoxide from MOPITT of 2000–2004 and comparisons with surface measurements in Mt. Waliguan Station[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2007, 18(1): 36–42.
- [8] 林云萍, 赵春生, 彭丽, 等. 利用 MOPITT 卫星资料计算 CO 源排放的新方法[J]. *科学通报*, 2007, 52(9): 19–26.  
Lin Yunping, Zhao Chunsheng, Peng Li, et al. A new method for calculating CO emissions using MOPITT satellite data[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(9): 19–26.
- [9] 白文广, 张鹏, 张兴赢, 等. 用卫星资料分析中国区域 CO 柱总量时空分布特征[J]. *应用气象学报*, 2010, 21(4): 473–483.  
Bai Wenguang, Zhang Peng, Zhang Xingying, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of carbon monoxide column amount over China based on satellite data[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2010, 21(4): 473–483.
- [10] Li L, Liu Y. Space-borne and ground observations of the characteristics of CO pollution in Beijing, 2000–2010[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45: 2367–2372.
- [11] 尉鹏, 任阵海, 陈良富, 等. 中国 CO 时空分布的遥感诊断分析[J]. *环境工程技术学报*, 2011, 1(3): 197–204.  
Wei Peng, Ren Zhenhai, Chen Liangfu, et al. Remote sensing diagnosis analysis of spatial and temporal distribution of carbon monoxide in China[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2011, 1(3): 197–204.
- [12] Pan L, Edwards D, Gille J C, et al. Satellite remote sensing of tropospheric CO and CH<sub>4</sub>: Forward module studies of the MOPITT instrument[J]. *Applied Optics*, 1995, 34: 6976–6988.
- [13] Deeter M N. MOPITT (Measurements of Pollution in the Troposphere) version 6 product user's guide[N/OL]. 2013–05–10. [http://www.acd.ucar.edu/mopitt/v6\\_users\\_guide\\_beta.pdf](http://www.acd.ucar.edu/mopitt/v6_users_guide_beta.pdf).
- [14] Emmons L K, Edwards D P, Deeter M N, et al. Measurements of pollution in the troposphere (MOPITT) validation through 2006[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(5): 1795–1803.
- [15] Liang Q, Jaeglé L, Jaffe D A, et al. Long-range transport of Asian pollution to the northeast Pacific: Seasonal variations and transport pathways of carbon monoxide[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(D23): D23S07, doi: 10.1029/2003JD004402.
- [16] Zhang Y. Mean global and regional distributions of MOPITT carbon monoxide during 2000–2009 and during ENSO[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45: 1347–1358.
- [17] 王可, 江洪, 张秀英, 等. 贝加尔湖地区 2003–2005 年间 CO 时空动态的遥感分析[J]. *遥感应用*, 2011(3): 19–26.  
Wang Ke, Jiang Hong, Zhang Xiuying, et al. Remote sensing analysis on the spatio-temporal gradients of carbon monoxide over lake baikal region during 2003–2005[J]. *Remote Sensing Information*, 2011(3): 19–26.
- [18] 许丽忠, 陈芳, 陈忠, 等. 中国八大经济区域 5 月与 7 月 CO 地面浓度时空分布规律研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(8): 1934–1941.  
Xu Lizhong, Chen Fang, Chen Zhong, et al. Spatial and temporal variation of near-ground CO concentration in the eight economic regions in China in May and July[J]. *Journal of Environmental Science*, 2014, 34(8): 1934–1941.
- [19] 刘诚, 孙友文, 司福祺, 等. 云层对卫星遥感大气 CO 的影响与修正方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(11): 2950–2955.  
Liu Cheng, Sun Youwen, Si fuqi, et al. The correction of cloud effect on satellite near-infrared measurement[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(11): 2950–2955.
- [20] 葛萃, 张美根. 东亚地区春季一氧化碳的输送特征研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2009, 39(2): 187–192.  
Ge Cui, Zhang Meigen. Characteristics of carbon monoxide transport over east Asia in the spring[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(2): 187–192.
- [21] 杨继东, 刘佳泓, 杨光辉, 等. 天津市环境空气中一氧化碳污染特征及变化趋势研究[J]. *环境科学与管理*, 2012, 37(6): 89–90.  
Yang Jidong, Liu Jiahong, Yang Guanghui, et al. Analysis on pollution characteristics and variation trend of CO in Tianjin[J]. *Environmental Science and Management*, 2012, 37(6): 89–90.
- [22] 谢旻, 王体健. 中国地区稻田 CH<sub>4</sub> 和生物质燃烧 CO 排放对对流层氧化性的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(11): 4803–4814.  
Xie Min, Wang Tijian. Modeling of CH<sub>4</sub> emission from rice paddies and CO emission from biomass burning and their effects on tropospheric oxidizing capacity in China[J]. *Journal of Ecology*, 2007, 27(11): 4803–4814.
- [23] 周凌晞, 温玉璞, 李金龙, 等. 瓦里关山大气 CO 本底变化[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(4): 637–642.  
Zhou Lingxi, Wen Yupu, Li Jinlong, et al. Background variation in atmospheric carbon monoxide at Mt. Waliguan[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 24(4): 637–642.
- [24] 王丽涛, 张强, 郝吉明, 等. 中国大陆 CO 人为源排放清单[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(12): 1580–1585.  
Wang Litao, Zhang Qiang, Hao Jiming, et al. Anthropogenic CO emission inventory of mainland China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 25(12): 1580–1585.
- [25] 史华峰. 卫星观测 CO 在大气对流层和平流层的时空分布特征[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.  
Shi Huafeng. Temporal and spatial distribution of CO in the atmospheric troposphere and stratosphere using satellite data[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013.

(责任编辑 吴晓丽)