

文章编号: 2096-1618(2020)06-0616-05

# 基于卫星数据的西南地区大气 CO 时空分布特征的分析

季雨平, 邓小波, 黄启宏, 樊昌元

(成都信息工程大学电子信息工程学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**大气中的一氧化碳(CO)是影响气候变化的重要大气微量气体,研究大气中的 CO 浓度对环境质量的监测有着重要意义。利用对流层观测仪(TROPOMI) L2 级产品的 CO 柱总量数据,得出中国区域在 2019 年的大气 CO 分布特征,CO 高值在中国东部沿海地区,西部较低。结合西南地区 5 省区市:西藏自治区、云南省、四川省、重庆市、贵州省的总人口和地区生产总值数据,分析中国西南区域在 2019 年的 CO 时空分布和季节变化特征。结果表明:西藏自治区和四川西部 CO 为最低值,在 2019 年的变化不明显,四川东部和重庆市 CO 含量最高,云南、贵州省最高值在春季,夏秋季降低。选取西南地区中的青藏高原东南部和四川盆地 2019 年的 CO 月均值,四川盆地为青藏高原的 2~3 倍,变化趋势明显,青藏高原东南部一年内趋于平稳。

**关键词:**卫星遥感;西南地区;大气 CO;TROPOMI;时空分布

**中图分类号:** TP79

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.06.006

## 0 引言

随着全球气候变暖,一氧化碳(carbon monoxide, CO)作为一种间接性温室气体,对温室效应的贡献起着至关重要的作用。长期接触低浓度的 CO 会影响人体健康,造成头晕乏力、恶心呕吐,更高浓度的 CO 甚至会对人体产生直接的危害,应该引起相关部门的重视<sup>[1]</sup>。CO 在通常状态下无色、无臭、无味,含碳量仅次于 CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>,是一种由不完全燃烧过程排放的大气微量气体。它与羟基自由基(OH)的氧化反应是其主要的“汇”。羟基自由基(OH)具有很强的氧化性,会氧化大气中的许多痕量气体。CO 对 OH 自由基氧化能力的影响间接对 O<sub>3</sub>、CH<sub>4</sub> 等气体在大气中的分布与含量起作用。CO 的主要来源是化石燃料燃烧、生物质燃烧以及甲烷和其他碳氢化合物的大气氧化。CO 在大气中停留时间很长,大概有几周到几个月,因而 CO 可以用于监测大气中的传输过程以及监测自然污染源(如生物质燃烧、野火)和人为起源<sup>[2]</sup>。因此,CO 可以从 3 个方面引起关注:一是作为决定空气质量的因子;二是作为羟基(OH)自由基的主要汇聚体;三是作为具有较长使用寿命的大气示踪剂<sup>[3]</sup>。

随着人类活动日渐频繁,环境污染日趋严重,为加强对对流层化学和长距离运输的认识,需要对大气中 CO 浓度进行时间连续性和全球性覆盖范围的测量,来

了解各个来源的排放率和地理分布情况。近几十年来,卫星遥感技术发展迅猛,正是由于其具有监测范围广、能够动态监测污染源和传输过程,弥补了传统站点空间分布和数量的限制。国外已经开展了很多有关大气遥感 CO 方面的研究,1981-1999 年的 4 次航天飞机飞行中,首次利用 MAPS(卫星测量造成的空气污染)仪器进行了 CO 的星载测量<sup>[4]</sup>,Tangborn 等<sup>[5]</sup>评估了 SCIAMACHY 同化柱总量数据对分析 CO 在全球和区域分布的影响。Chandrad 等<sup>[6]</sup>利用 MOPITT 数据研究印度 5 个选定地区对流层 CO 分布的特征,分析了长距离运输对对流层 CO 分布的影响。近年来,中国开始对大气对环境影响的重视,陆续展开了关于大气中 CO 的研究。李倩等<sup>[7]</sup>利用 MLS 和 MOPITT 数据及 ACCMIP 排放数据研究了热带地区从地表层到低平流层的一氧化碳(CO)的分布和变化。王甜甜等<sup>[8]</sup>利用 AIRS 近地表数据和 MODIS 火点数据分析中国东北区域的 CO 浓度变化特征以及生物质燃烧的影响。赵学良等<sup>[9]</sup>将 NOAA 本底观测站的 CO 月均值数据和 MOPITT 仪器测量的对流层 CO 浓度进行了比较研究。

使用对流层检测仪(TROPOMI) L2 级产品的 CO 柱总量数据。由于数据是从 2018 年 4 月底公开发布,选取 2019 年数据,提取该时间段内的中国地区 CO 柱总量数据,转换为 1°×1°月均值数据,分析中国地区在 2019 年的 CO 分布特征。由于现今小区域尺度的时空分布特征分析较少,中国西南地区相关研究较少,结合西南地区 5 个省区市(西藏自治区,四川省,云南省,贵州省,重庆市)的总人口数和地区生产总值数据并分析西南地

区在2019年的CO季节分布特征。分别选出其中具有代表性的青藏高原东南部和四川盆地地区的月均值数据,对比这两个区域在2019年的变化特征。

## 1 数据与方法

### 1.1 数据介绍及处理

对流层监测仪(TROPOMI)是哥白尼“哨兵-5P”(sentinel-5 precursor, S-5P)卫星上搭载的卫星仪器。S-5P是哨兵系列中第一个监测大气成分的卫星,其卫星搭载了遥感传感器“对流层观测仪”(tropospheric monitoring instrument, TROPOMI),欧洲航天局(ESA)在2017年10月13日俄罗斯普列谢茨克航天发射场成功发射,计划执行为期7年的任务,对全球空气质量、气候和臭氧层进行监测<sup>[10]</sup>。TROPOMI是一种用于测量紫外-可见光波长(270~500 nm)、近红外(710~770 nm)和短波红外(2314~2382 nm)的最低点光栅光谱仪。该仪器利用被动遥感技术,通过在大气层顶部测量地球反射的太阳辐射监测大气成分。在2.3 μm短波红外(SWIR)的光谱范围,对CO有较高的灵敏度。TROPOMI的数据从2018年4月底结束为期6个月的仪器调试和校准阶段,进入正常运行模式,目前公开发布的有L1B和L2级产品数据。数据从公开发布起到8月5日空间分辨率为7×7 km,8月6日后空间分辨率为7×5.5 km。表1总结的为TROPOMI L2级CO产品中数据质量使用的定义。数据质量为连续质量描述符,在0(无数据)和1(完整质量数据)之间。 $\tau_{\text{aer}}$ 为云光学厚度, $z_{\text{cld}}$ 为云高,SZA为太阳天顶角, $\text{irow} \leq 1$ 滤除了最西边的两个像素由于未校准的问题。(参考数据质量定义来源:www.tropomi.eu/data-products/carbon-monoxide)。

表1 数据质量参数定义

数据质量	条件	
1.0	$\tau_{\text{aer}} < 0.5$ $z_{\text{cld}} < 500$ m	晴空观测
0.7	$\tau_{\text{aer}} \geq 0.5$ $z_{\text{cld}} < 5000$ m	中云观测
0.4	$\tau_{\text{aer}} \geq 0.5$ $z_{\text{cld}} \geq 5000$ 或 $\tau_{\text{aer}} \leq 0.5$ $z_{\text{cld}} \geq 500$ m	多云观测, 实验数据集
0.0	$\text{irow} \leq 1$ 或 $\text{SZA} \geq 80^\circ$ 或不合格的产品	损坏或有缺陷的数据

选TROPOMI公开发布L2级产品CO柱总量数据,数据时间为2019年,时间分辨率为101.5 min,利用Python编程,筛选出数据质量大于0.5的数据,即滤除了多云条件下的数据,保留晴空和中云观测。把中国地区数据提取出来处理成 $1^\circ \times 1^\circ$ 的年均值数据,生成 $39 \times 63$ 的数据集。选取西南地区处理为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的月均值数

据,生成 $34 \times 66$ 的数据集(单位为 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ )。其中,每一个数据集代表一个格点,计算一定时间范围内每个格点内所有柱总量数据之和,再除以格点内数据的个数即可得出均值数据,把得出的数据存入表格中用于统计和分析。

人口和地区生产总值数据来源于国家数据网,分别为2019年西南地区的年末常住人口数(单位:万人)和地区生产总值(单位:亿元),为分省年度数据。

### 1.2 研究区域

研究所选经纬度为 $73^\circ \text{E} \sim 136^\circ \text{E}$ ,  $13^\circ \text{N} \sim 54^\circ \text{N}$ ,包含东亚地区西北部大部分区域,属于人口较为稠密的区域之一,地形西高东低,西部山地、高原较多,东部地区沿海,多为平原和丘陵。文中主要分析中国大陆区域的CO柱总量分布特征,西南地区为中国行政区划的定义,包含西藏自治区、四川省、重庆市、云南省、贵州省5个省区市。地理上涵盖了青藏高原东南部、四川盆地、云贵高原东部,因此比较显著突出的三类气候分别为温差较大的高原季风气候、湿润的中亚热带季风气候、四季如春的中南亚热带季风气候。所选经纬度范围如图1所示( $20^\circ \text{E} \sim 37^\circ \text{E}$ ,  $78^\circ \text{N} \sim 111^\circ \text{N}$ ),主要分析西南5个省区市的CO季节变化特征。

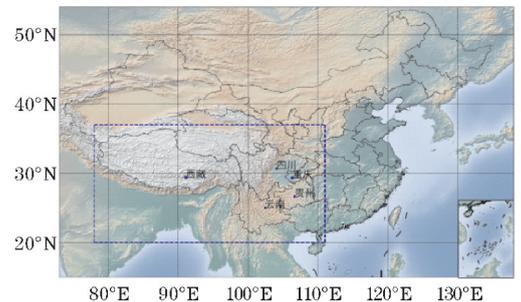


图1 研究范围

选取西南地区中分别具有代表性的地区:四川盆地( $28^\circ \text{N} \sim 32^\circ \text{N}$ ,  $103^\circ \text{E} \sim 108^\circ \text{E}$ )和青藏高原东南部( $28^\circ \text{N} \sim 32^\circ \text{N}$ ,  $103^\circ \text{E} \sim 108^\circ \text{E}$ ),四川盆地四周环绕山地和高原,人口密集、资源丰富,青藏高原是世界海拔最高的高原,地势广阔、人口稀少,分别记录这两个地区在2019年的CO月均值,分析其一年的变化曲线。

## 2 结果与分析

### 2.1 CO时空分布特征

图2为2019年中国地区平均CO柱总量时空分布,大气中的CO分布与中国地区人类活动,工业发展,地域经济水平和地形分布密切相关。高值区主要位于人口活动多,工业发达的中国东部沿海地区。其

中可以明显地看出一年中 CO 平均柱总量最高的区域位于华北地区,华北地区有较多重工业,人口活动频繁,北方冬季供暖等原因导致一年中 CO 污染较为严重,大型工厂、汽车尾气等排放的 CO 在大气中聚集,北方天气干燥等气候条件,促使污染物飘浮在空气中,不利于在大气中扩散,导致 CO 柱总量持续升高。西部地区 CO 值偏低,最低点位于青藏高原一带。

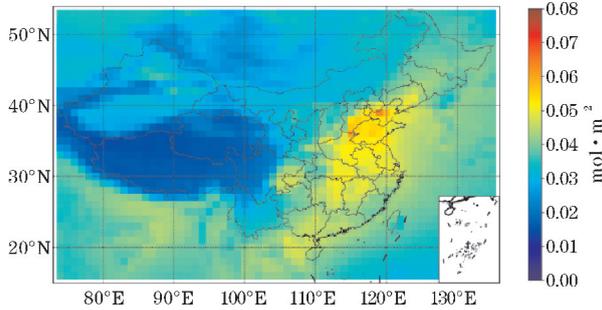
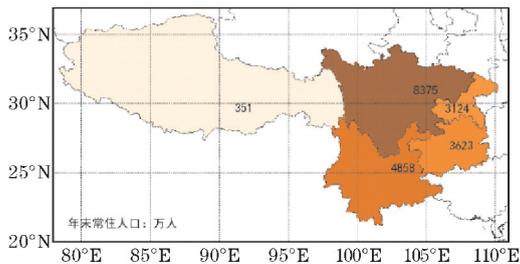
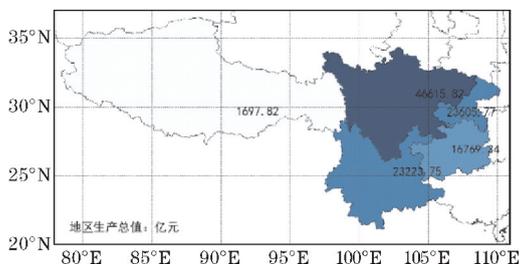


图2 2019年中国地区CO分布

图3为西南地区5个省区市的总人口数和地区生产总值。图3(a)为2019年年度总人口数,图3(b)为2019年年度各产业增加值的总和。四川人口最多,且集中在东部,地区生产总值也为西南地区最高。西藏自治区虽然地势广阔,受其地理气候条件的影响,人口少且地区生产总值为西南地区最低。重庆市占地面积小,但是人口密度大,是西南地区最大的工商业城市。云南、贵州省总人口数仅次于四川,两地多为山地和丘陵,地区生产总值低于四川和重庆。西南5省区市总人口数由多到少排序为四川>云南>贵州>重庆>西藏。地区生产总值由多到少为四川>重庆>云南>贵州>西藏。人口密度、经济与地理条件有着密不可分的联系,同时大气当中的CO含量也与其相关联。



(a) 年末常住人口



(b) 地区生产总值

图3 2019年西南5省区市人口数和地区生产总值

西南地区5个省区市的CO柱总量如图4,西藏自治区和四川西部所处的青藏高原的CO柱总量为最低值区,青藏高原为中国最大、世界海拔最高的高原,有着独特的高原气候,气温低,日温差大,太阳辐射强。由于其面积广阔,地势高,人口稀少,较少的工业,经济发展相对较缓慢,大气中CO含量也因此为最低值。由西向东随着海拔逐渐降低,CO含量也随之增高。相邻的四川盆地为西部最高值区域,主要包含四川省大部分和重庆市小半部分区域,海拔中间低,四周高,太阳辐射少,资源丰富,气候降水充沛,气候湿润,季节分配均匀,四川和重庆的人口大多聚集于此。正是因为其人口密度大,有重工业企业,地面风速小,大气中不利于CO等污染向外扩散,使一年内的CO柱总量较高。贵州地处云贵高原,气温变化小,气候冬暖夏凉,温暖湿润。云南气候多样,一年内温差较小,日温差大。云南和贵州省的CO柱总量位于四川盆地和青藏高原之间。

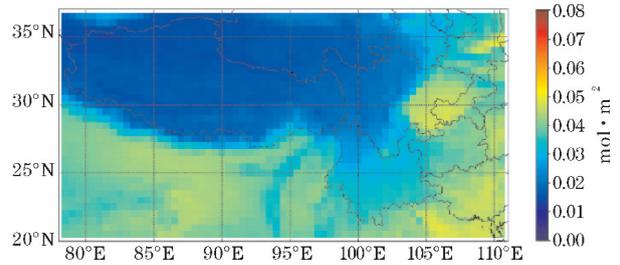


图4 2019年西南地区CO分布

## 2.2 西南地区季节分布特征

西南地区在2019年的季节分布特征如图5所示,西藏自治区和四川西部一年的CO柱总量平均值无明显的变化,一直呈最低值。云南、贵州在春季(3-5月)CO月均值上升,达到最高值,这可能与春季生物质的燃烧、受周边国家及地区的影响有关,在夏季(6-8月)下降。四川东部和重庆市最高值在2019年的冬季(1-2月),到夏季(6-8月)又下降,夏季因为温度、湿度高,辐射强对OH自由基的产生有利,与大气中的CO反应,以致CO含量的减少,秋季(9-11月)趋于平稳,冬季(12月)开始又有回升趋势。冬季伴随着温湿度的降低,OH自由基的减少,CO长时间的累积作用使得CO含量增加。除了西藏自治区和四川西部以外,其余地区均有明显的季节分布特征,CO柱总量在春、冬季偏高,夏、秋季降低,与方圆等<sup>[11]</sup>研究结果较为一致。具体数值选取两个典型区域来对比分析。

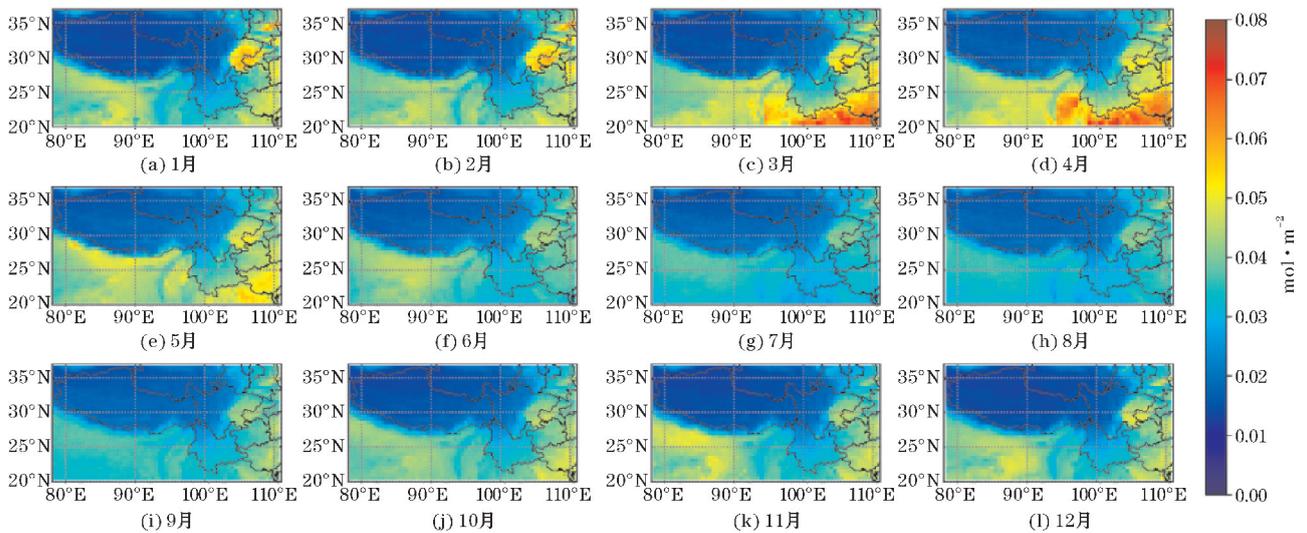


图 5 2019 年西南地区月平均 CO 分布

### 2.3 两个地区月均值折线图

选取西南地区所包含的青藏高原东南部和四川盆地两个典型的区域,计算两地的 CO 柱总量的月均值,分析在 2019 年两地的变化趋势并对比,如图 6 所示。青藏高原东南部 CO 柱总量一直为最低值,在  $0.02 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$  左右浮动,从 2019 年 3 月开始有轻微的增长,5 月达到其最高值  $0.025 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,之后一直为缓慢下降趋势。四川盆地的 CO 柱总量为青藏高原东南部的 2 ~ 3 倍,峰值在 2019 年 2 月,为  $0.048 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ,从 3 月开始一直下降,谷值在 2019 年 7 月,为  $0.036 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从 8 月开始 CO 柱总量在  $0.035 \sim 0.04 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$  波动,直到年底有上升趋势,总体在春、冬季偏高,夏、秋季较低,说明 2019 年的 CO 柱总量在四川盆地有着季节变化特征,而青藏高原一直处于较为平稳的走势。

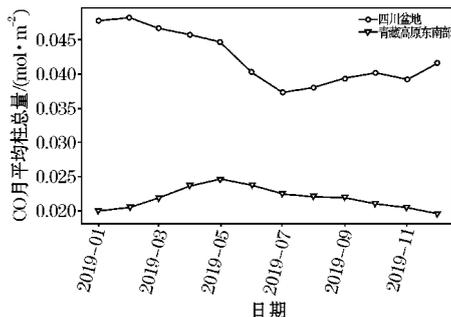


图 6 青藏高原东南部和四川盆地 CO 月均值

## 3 结束语

选用 TROPOMI L2 级产品的 CO 柱总量数据,分析中国西南地区 2019 年大气 CO 分布特征以及季节变化。中国 2019 年 CO 分布具有东高西低的特点,人口稠密、重工业多、经济发达的东部沿海地区的 CO 柱总量明显

高于西部地区,一年中中国 CO 最高值位于华北地区。结合国家统计局的总人口和地区生产总值数据,得出西南 5 省市区的人口和地区生产总值分布图。经济和人口与当地地理和气候条件有着密切的联系,同时也与大气当中的 CO 分布有关。西南地区 CO 柱总量最低值位于人口稀少,海拔高的西藏自治区和四川西部,而人口集中的四川东部和重庆市为西南地区最高值,云南和贵州省介于其中。

CO 在西南地区的季节分布除了在西藏自治区和四川西部变化不明显以外,其余地区均有春、冬季高,夏、秋季降低的特征。云南和贵州省最高值在春季,可能与周边国家及地区的生物质燃烧有关。四川东部和重庆市在冬季为最高值,夏秋季降低,原因为夏季 OH 自由基在高温、高湿、辐射强的条件下有利于生成,与大气当中的 CO 反应使 CO 含量降低,相反冬季增加。记录青藏高原东南部和四川盆地在 2019 年的月均值曲线图,四川盆地最高值在 2019 年 2 月,最低值在 7 月,下降了  $0.012 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$ 。青藏高原东南部的 CO 月均值在  $0.02 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2}$  左右起伏,一年走势趋于平稳。

TROPOMI 具有高分辨率,全天覆盖的时间连续性观测的能力,遥感反演的近实时 CO 数据产品可以定位污染源、进行小区域尺度的热点观测,实时监测污染的传输过程,为大气环境污染监测提供更高精度的数据。然而,卫星资料无法区分生物质燃烧和人为排放,CO 生存周期较长的特点导致难以区分 CO 污染来源为当地区域排放和来自污染的传输,在之后的研究当中,还需要一些排放数据来辨别两者的相对大小和与大气 CO 分布的相关性,进行局部区域尺度的热点观测,掌握大气污染的新动态,为环境保护做出有力的贡献。

### 参考文献:

[1] 田彪,丁明虎,孙维君,等. 大气 CO 研究进展

- [J]. 地球科学进展, 2017, 32(1): 35-43.
- [2] Borsdorff T, Andrasc J, de Brugh J A, et al. Detection of carbon monoxide pollution from cities and wildfires on regional and urban scales; the benefit of CO column retrievals from Sciamachy 2.3  $\mu\text{m}$  measurements under cloudy conditions [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11(5): 2553-2565.
- [3] Holloway T, Levy H II, Kasibhatla P, et al. Global distribution of carbon monoxide [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(5): 12123-12147.
- [4] Reichle JR H, Connors V S. The Mass of CO in the Atmosphere during October 1984, April 1994, and October 1994 [J]. Journal of The Atmospheric Sciences, 1999, 56(1): 307-310.
- [5] Tangborn A, Stajner I, Buchwitz M, et al. Assimilation of SCIAMACHY total column CO observations: Global and regional analysis of data impact [J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(4): 1-11.
- [6] Chandra N, Venkataramani S, Lal S, et al. Effects of convection and long-range transport on the distribution of carbon monoxide in the troposphere over India [J]. Atmospheric Pollution Research, 2016, 7(5): 775-785.
- [7] Qian L, Hua Feng S, AiMei S, et al. Distribution and Variation of Carbon Monoxide in the Tropical Troposphere and Lower Stratosphere [J]. Distribution and Variation of Carbon Monoxide in the Tropical Troposphere and Lower Stratosphere, 2014, 7(3): 218-223.
- [8] 王甜甜, 陈良富, 陶金花, 等. 生物质燃烧对中国东北地区 CO 浓度的影响研究 [J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(2): 297-306.
- [9] 赵学良, 池天河. 基于 MOPITT 数据的 CO 浓度时空分布规律研究 [J]. 环境科学技术, 2018, 41(4): 71-76.
- [10] 李旭文, 张悦, 姜晟, 等. “哨兵-5P” 卫星 TROPOMI 传感器在江苏省域大气污染监测中的初步应用 [J]. 环境监测与预警, 2019, 11(2): 10-16.
- [11] 方圆圆, 赵春生, 李成才, 等. 利用对流层污染测量仪研究 2002 年东亚地区 CO 总量分布特征 [J]. 大气科学, 2005, 29(3): 363-369.
- [12] 常越, 邓小波, 刘海磊, 等. 中国区域近地面及高空 CH<sub>4</sub> 时空分布特征研究 [J]. 环境科学与技术, 2017, 40(1): 161-166.
- [13] 王占山, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年北京市 CO 浓度水平和时空分布 [J]. 中国环境监测, 2018, 34(3): 14-19.
- [14] Hochstaffl P, Schreier F, Lichtenberg G, et al. Validation of Carbon Monoxide Total Column Retrievals from SCIAMACHY Observations with NDACC/TCCON Ground-Based Measurements [J]. remote sensing, 2018, 223(10): 1-32.

## Spatial and Temporal Distribution of Atmospheric CO in Southwest China based on Satellite Data

JI Yuping, DENG Xiaobo, HUANG Qihong, FAN Changyuan

(College of Electronic Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 601225, China)

**Abstract:** Carbon monoxide (CO) is an important atmospheric trace gas that affects climate change in the atmosphere. The study of CO concentration in the atmosphere is of great significance to the monitoring of environmental quality. With the total CO column data of TROPOMI L2 products, the atmospheric CO distribution characteristics in China in 2019 are obtained. The high CO values are in the eastern coastal areas of China and lower in the west. Based on the data of the total population and gross regional product of the five provinces and municipalities in the southwest: Tibet Autonomous Region, Yunnan Province, Sichuan Province, Chongqing City, and Guizhou Province, the temporal and spatial distribution of CO in Southwest China in 2019 and its seasonal changes are analyzed. The results show that: The lowest values were found in Tibet Autonomous Region and western Sichuan province, and the changes in 2019 are not obvious. The CO total column was highest in eastern Sichuan and Chongqing, and Yunnan and Guizhou have the highest values in spring, and it falls in summer and autumn. The southeast of the Qinghai-Tibet Plateau in the southwestern region and the Sichuan Basin were selected to calculate the monthly mean values of CO in 2019. The monthly average values of the Sichuan Basin were 2 to 3 times that of the the southeastern Qinghai-Tibet Plateau, and the change trend was obvious, while in the southeastern Qinghai-Tibet Plateau was stable within a year.

**Keywords:** satellite remote sensing; Southwest China; atmospheric CO; TROPOMI; spatial and temporal distribution