

# 全球对流层中层二氧化碳柱浓度数据集 (2003–2015)

符传博<sup>1,2</sup>, 丹利<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院大气物理研究所, 东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029;
2. 海南省气象科学研究所, 海口 570203

**摘要:** 人类活动导致大气中温室气体浓度上升, 是全球气候变暖的重要原因之一。基于美国 Aqua 卫星搭载的大气红外垂直遥感器 (AIRS-Atmospheric Infrared Sounder) 数据反演的 2003–2015 年全球对流层中层 CO<sub>2</sub> 柱浓度资料, 利用地基观测结果对其进行验证, 并对其进行时空变化进行分析, 得出数据全球对流层中层二氧化碳柱浓度数据集 (2003–2015)。数据结果表明: 北半球 30°N–60°N 是 CO<sub>2</sub> 浓度高值带, 低值中心主要出现在 15°S–15°N, 140°W–100°E 的低纬地区。地基观测与 AIRS 卫星反演结果基本一致, 年增长率约为 1.926 ppmv/a。该数据集包括: (1) 2003–2015 年全球对流层中层 CO<sub>2</sub> 柱浓度; (2) 全球对流层中层 CO<sub>2</sub> 柱浓度年平均增长率; (3) 2003 年 1 月–2015 年 12 月地基观测与 AIRS 反演结果对比。该数据集存储为.xlsx 和.tif 格式, 数据量为 292 KB (压缩为 1 个文件, 246 KB)。该数据集的分析成果发表在《地球物理学报》2018 年第 61 卷第 11 期。

**关键词:** CO<sub>2</sub>; 卫星遥感; 全球; 地球物理学报

**DOI:** 10.3974/geodp.2019.03.04

## 1 前言

工业革命以来, 全球经济发展迅速, 人口大量增加, 导致化石燃料过度使用, 二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 浓度急剧上升<sup>[1–2]</sup>。研究表明全球气候、生态系统、经济领域等各个方面已经受到了温室气体升高造成的影响<sup>[3–4]</sup>。因此, 监测大气中 CO<sub>2</sub> 浓度的变化特征对有效的制定政府减排政策, 深入认识全球碳循环、揭示碳的源和汇等都有重要意义。本文根据美国宇航局 (NASA) Aqua 卫星搭载的大气红外垂直遥感器 (AIRS- Atmospheric Infrared Sounder) 数据, 通过计算模型, 反演出全球对流层中层 CO<sub>2</sub> 浓度数据, 计算得到全球 CO<sub>2</sub> 浓度的平均增长率, 然后通过这些数据与 5 个本底站观测数据 2003–2015 年的对比得到数据结果。这个数据结果可为全面分析全球不同区域对流层 CO<sub>2</sub> 浓度的非均匀分布和增长率提供科学参考和数据支撑。

## 2 数据集元数据简介

全球对流层中层二氧化碳柱浓度数据集 (2003–2015)<sup>[5]</sup>的名称、作者、地理区域、数

**收稿日期:** 2019-04-18; **修订日期:** 2019-06-06; **出版日期:** 2019-06-25

**基金项目:** 中华人民共和国科学技术部 (2016YFA0602501); 国家自然科学基金 (41630532, 41575093)

**\*通讯作者:** 丹利 D-4834-2018, 中国科学院大气物理研究所, 东亚区域气候-环境重点实验室, danli@tea.ac.cn

**数据引用方式:** [1] 符传博, 丹利. 全球对流层中层二氧化碳柱浓度数据集 (2003–2015) [J]. 全球变化数据学报, 2019, 3(2): 149–154. DOI: 10.3974/geodp.2019.02.04.

[2] 符传博, 丹利. 全球对流层中层二氧化碳柱浓度数据集 (2003–2015) [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2019. DOI: 10.3974/geodb.2019.03.07.V1.

据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 全球对流层中层二氧化碳柱浓度数据集（2003-2015）元数据简表

条目	描述
数据集名称	全球对流层中层二氧化碳柱浓度数据集（2003-2015）
数据集短名	GlobalTropoCO2_2003-2015
作者信息	符传博 B-8133-2019, 海南省气象科学研究所, hnfuchuanbo@163.com 丹利 D-4834-2018, 中国科学院东亚区域气候-环境重点实验室, danli@tea.ac.cn
地理区域	全球
数据年代	2003-2015 年
时间分辨率	2003-2015 年年平均值, 2003-2015 年逐月变化值
空间分辨率	2° ( 纬度 ) ×2.5° ( 经度 )
数据格式	.xlsx、.tif
数据量	292 KB
数据集组成	由 1 个 Excel 文件和一个文件夹组成, Excel 文件有 3 个工作表, 分别是: ( 1 ) 2003-2015 年全球对流层中层 CO <sub>2</sub> 柱浓度; ( 2 ) 全球对流层中层 CO <sub>2</sub> 柱浓度年平均增长率; ( 3 ) 2003 年 1 月-2015 年 12 月地基观测与 AIRS 反演结果对比。 Excel 文件的数据量为 204 KB。文件夹有两个.tif 文件, 数据量为 87.8 KB。
基金项目	中华人民共和国科学技术部 ( 2016YFA0602501 ); 国家自然科学基金 (41630532, 41275082)
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 <a href="http://www.geodoi.ac.cn">http://www.geodoi.ac.cn</a>
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据 ( 中英文 )、实体数据 ( 中英文 ) 和通过《全球变化数据学报》( 中英文 ) 发表的数据论文。其共享政策如下: ( 1 ) “数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载; ( 2 ) 最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源; ( 3 ) 增值服务用户或以任何形式散发和传播 ( 包括通过计算机服务器 ) “数据”的用户需要与《全球变化数据学报》( 中英文 ) 编辑部签署书面协议, 获得许可; ( 4 ) 摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 <sup>[6]</sup>

3 数据研发方法

3.1 基础数据

本文所用到的对流层中层 CO<sub>2</sub> 浓度数据下载自美国宇航局 ( NASA ) 网站。2002 年 5 月, NASA 的 Aqua 卫星成功发射, 运行在太阳同步的近极地轨道, 并承担了观测全球水和能量循环、气候变化趋势, 以及气候系统对温室气体增加的响应等科学目的<sup>[7]</sup>。大气红外垂直遥感器 AIRS 搭载在 Aqua 卫星上, 拥有 2,378 个探测通道, 测量 8.8-15.5 μm、6.2-8.2 μm 和 3.75-4.58 μm 三个波段的射出辐射, 反演出逐日的、全球范围内的 CO<sub>2</sub> 浓度, 其中还包括陆地、海洋和极地等地区的 CO<sub>2</sub> 浓度<sup>[8]</sup>。AIRS CO<sub>2</sub> 产品反演的方法主要为偏导数归零法 ( Vanishing Partial Derivative, VPD )<sup>[9]</sup>, CO<sub>2</sub> 产品在星下点的空间分辨率为 90 km×90 km, 空间覆盖范围为 90°N-60°S。其三级 CO<sub>2</sub> 产品是通过二级标准数据进行网格平均所得, 空间分辨率为 2°( 纬度 )×2.5°( 经度 )。本文所使用的三级月平均 CO<sub>2</sub> 浓度数据版本为 version

5, 数据产品下载自 NASA 官方网站 (<https://airs.jpl.nasa.gov>)。本文中使用的 5 个全球本底观测站 CO<sub>2</sub> 浓度资料下载自 WMO WDCGG 网站 (<http://gaw.kishou.go.jp/wdcgg/wdcgg.html>)。本底观测站名称分别为 Mauna Loa、Waliguan、Niwt Ridge、Sonnblick 和 Summit, 其中有关 WMO WDCGG 本底站数据的测量方法和质量控制可以参见文献<sup>[10]</sup>。

### 3.2 数据集研发算法原理

本文在参考相关文献[11-12]的基础上, 按照下列算法研发数据。具体计算方法如下: 对于 2003-2015 年, 全球空间分辨率为 2° (纬度) × 2.5° (经度) 的 CO<sub>2</sub> 浓度逐月资料进行年平均处理, 共 13 年 (样本量  $n=13$ )。对全球范围每一个格点上的 CO<sub>2</sub> 浓度值进行 13 年平均计算, 得到 2003-2015 年共 13 年平均的 CO<sub>2</sub> 浓度值, 结果见数据文件夹中.xlsx 文件里面 Tab.1。

每一个格点上的 CO<sub>2</sub> 浓度值 13 个样本序列为  $x_j$ , 用  $t_j$  表示对应的时刻, 建立  $x_j$  和  $t_j$  之间的一元线性回归方程:

$$x_j = a + bt_j \quad (1)$$

式中,  $a$  为回归常数,  $b$  为回归系数。利用最小二乘法可求出  $a$  和  $b$ 。

$$\begin{cases} b = \frac{\sum_{j=1}^n x_j t_j - \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n x_j \right) \left( \sum_{j=1}^n t_j \right)}{\sum_{j=1}^n t_j^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^n t_j \right)^2} \\ a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j - b \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_j \end{cases} \quad (2)$$

回归系数  $b$  的符号表示所研究序列的线性趋势。 $b > 0$  表示呈增加趋势,  $b < 0$  表示呈减少趋势。 $b$  的大小反映增加或减少的速率。本文将回归系数  $b$  称为 CO<sub>2</sub> 浓度年平均增长率。根据上述公式, 计算出全球 CO<sub>2</sub> 浓度年平均增长率  $b$  数据, 见数据文件夹中.xlsx 文件里面的 Tab.2。

从 WMO WDCGG 网站选择的 5 个全球本底观测站经纬度, 提取出经纬度所在格点对应的 AIR CO<sub>2</sub> 浓度逐月资料, 与本底观测站 CO<sub>2</sub> 浓度资料进行对比分析, 其结果见数据文件夹中.xlsx 文件里面的 Tab.3。

## 3 数据结果与验证

### 3.1 数据集组成及数据可视化

数据结果包括:

- (1) 2003-2015 年全球对流层中层 CO<sub>2</sub> 柱浓度;
- (2) 全球对流层中层 CO<sub>2</sub> 柱浓度年平均增长率;
- (3) 2003 年 1 月-2015 年 12 月地基观测与 AIRS 反演结果对比。

上述数据的地图可视化如图 1-3 所示。从图 1 和图 2 中可知, 北半球不论是 CO<sub>2</sub> 浓度,

还是浓度的增长率，都明显高于南半球。 $\text{CO}_2$  浓度高值主要分布在  $30^\circ\text{N}$ – $60^\circ\text{N}$  的高纬地区，而年平均增长率超过 2 ppmv/a 的区域位于  $60^\circ\text{N}$  以北的北冰洋、西伯利亚地区、北美东北部和格陵兰岛，这与全球变暖背景下北半球高纬地区升温较快的趋势一致。

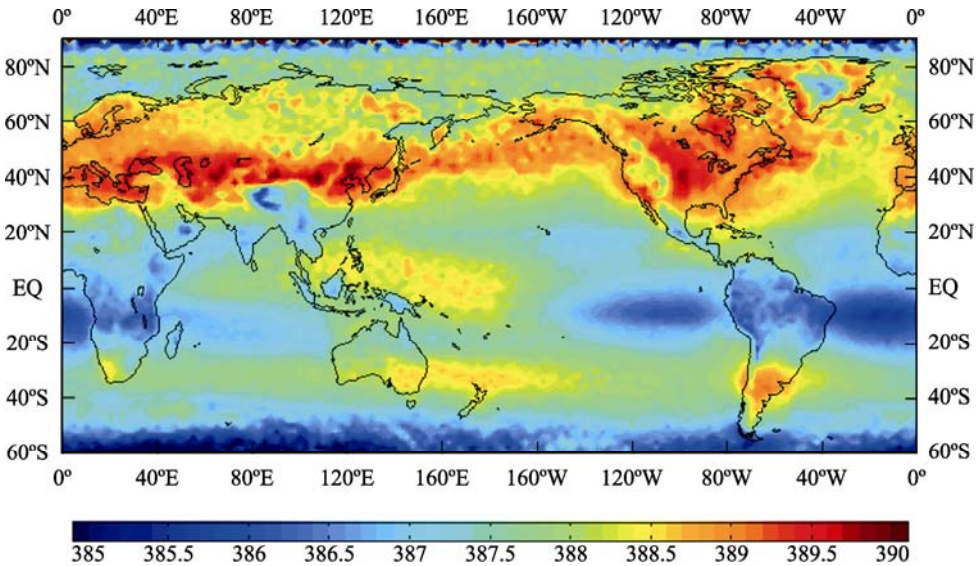


图 1 2003 年–2015 年平均的全球对流层中层  $\text{CO}_2$  浓度 (ppmv) [13]

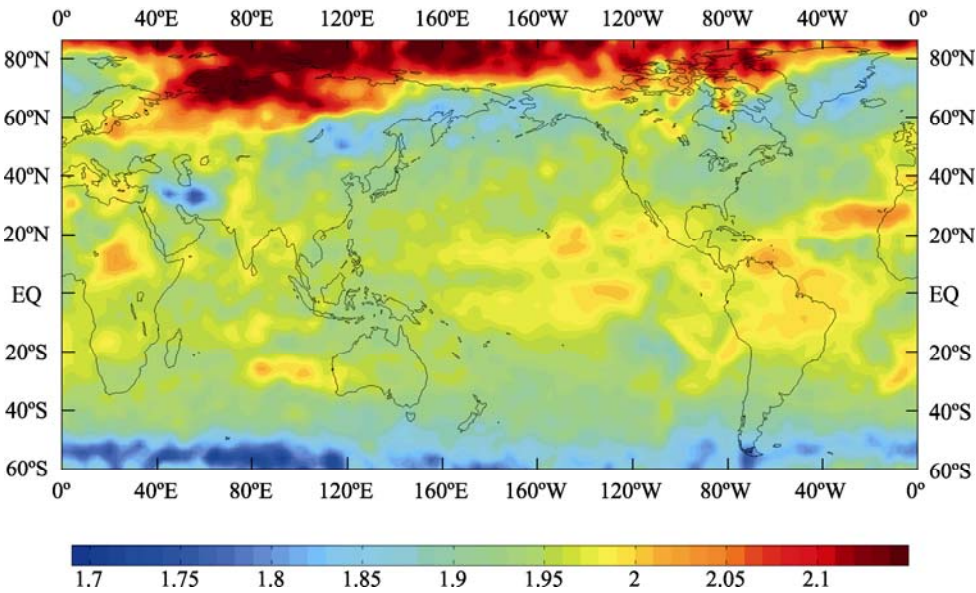


图 2 2003–2015 年全球对流层  $\text{CO}_2$  浓度年平均增长率 (ppmv) [13]

结合图 3 和表 2 的分析可得，地基观测的  $\text{CO}_2$  浓度与 AIRS 卫星反演的数据有很好的—致性，AIRS 卫星能较为准确地反映对流层中层  $\text{CO}_2$  浓度。5 个地基观测站观测的  $\text{CO}_2$  年增长率和平均值与卫星反演的十分接近，相关系数最高的为 Mauna Loa 站，达到 0.978，

最低的 Sonnblick 站，相关系数也达到 0.754，5 个站点的相关系数均超过来了 99.9%的信度检验。

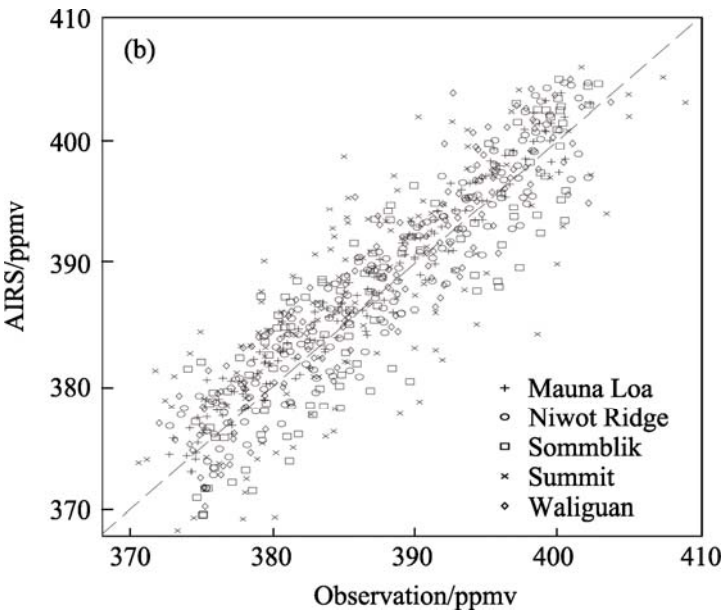


图 3 本底站观测的月平均 CO<sub>2</sub> 浓度值与 AIRS 卫星反演结果对比<sup>[13]</sup>

表 1 2003 年 1 月-2015 年 12 月地基观测与 AIRS 反演结果对比<sup>[12]</sup>

站名	本底站位置			年增长率 (ppmv/a)		均值 (ppmv)		月均相关系数	信度水平 (%)
	纬度 (°)	经度 (°)	高度 (m)	本底	AIRS	本底	AIRS		
Mauna Loa	19.539	-155.58	3,397	1.914	1.956	387.933	386.765	0.978	99.9
Waliguan	36.28	100.90	3,810	1.926	1.901	388.214	386.989	0.948	99.9
Niwot Ridge	40.053	-105.59	3,523	1.943	1.935	388.647	387.909	0.882	99.9
Sonnblick	47.05	12.95	3,106	1.876	1.975	387.699	388.072	0.754	99.9
Summit	72.58	-38.48	3,238	1.972	1.865	388.672	385.504	0.925	99.9

4 讨论和总结

本数据基于 AIRS 卫星反演的全球对流层中层 CO<sub>2</sub> 浓度资料进行处理，旨在为人为排放的温室气体引起的全球气候变化提供数据依据。数据展示了全球范围的对流层中层 CO<sub>2</sub> 浓度分布、年平均增长率和与本底观测的对比分析，结果表明 CO<sub>2</sub> 浓度高值主要分布在 30°N~60°N 的高纬地区，而年平均增长率大值区位于 60°N 以北的高纬地区，这与全球变暖背景下北半球高纬地区升温较快的趋势一致。基于地基观测的误差检验表明，地基观测的 CO<sub>2</sub> 浓度与 AIRS 卫星反演的数据有很好的一致性，AIRS 卫星能较为准确地反映对流层中层 CO<sub>2</sub> 浓度。利用卫星遥感方法来探测大气 CO<sub>2</sub> 浓度是有很大优势的，但是卫星资料一般年限较短，对研究长时间序列的大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化有一定的局限性。另外，如何进一步

优化反演算法, 提高卫星资料的精度也是卫星遥感领域的重点和难点之一。尽管如此, 卫星反演资料在研究全球碳循环、人类活动对大气 CO<sub>2</sub> 浓度分布的影响等问题上越来越受到青睐, 是评估未来全球变暖趋势的一个重要技术支撑。

**作者分工:** 丹利对数据集的开发和算法做了总体设计; 符传博对数据进行处理并撰写了数据论文。

## 参考文献

- [1] Tarasova, O., Koide, H., Dlugokencky, E., *et al.* The state of greenhouse gases in the atmosphere using global observations through 2011 [J]. *Egu General Assembly*, 2012, 8:11012.
- [2] Butz, A., Guerlet, S., Hasekamp, O., *et al.* Toward accurate CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> observations from GOSAT [J]. *Geophysical Research Letter*, 2011, 38(14): L14812. DOI: 10.1029/2011GL047888.
- [3] 丁一汇, 任国玉, 石广玉等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
- [4] Barros, V., Broome, J., Clarke, L., *et al.* Climate change 2014: synthesis report [R]. Switzerland: IPCC Fifth Assessment Report, 2014: 151.
- [5] 符传博, 丹利. 全球对流层中层二氧化碳柱浓度数据集(2003-2015) [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2019. DOI: 10.3974/geodb.2019.03.07.V1.
- [6] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017 年更新).
- [7] 姚志刚, 赵增亮, 韩志刚. AIRS 观测的东亚夏季平流层重力波特征[J]. 地球物理学报, 2015, 58(4): 1121-1134.
- [8] Chahine, M. T., Chen, L., Dimotakis, P., *et al.* Satellite remote sounding of mid-tropospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L17807.
- [9] Chahine, M., Barnet, C., Olsen, E. T., *et al.* On the determination of atmospheric minor gases by the method of vanishing partial derivatives with application to CO<sub>2</sub> [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L22803.
- [10] 赵玉成, 温玉璞, 德力格尔等. 青海瓦里关大气 CO<sub>2</sub> 本底浓度的变化特征[J]. 中国环境科学, 2006, 26(1): 1-5.
- [11] Bai, W. G., Zhang, X. Y., Zhang, P. Temporal and spatial distribution of tropospheric CO<sub>2</sub> over China based on satellite observations [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(31): 3612-3618. DOI: 10.1007/s11434-010-4182-4.
- [12] 刘立新, 周凌晞, 张晓春等. 我国 4 个国家级本底站大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化特征[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(2): 222-228.
- [13] 符传博, 丹利, 冯锦明等. 我国对流层二氧化碳非均匀动态分布特征及其成因[J]. 地球物理学报, 2018, 61(11): 4373-4382.