

全球大气二氧化碳浓度 $2^\circ \times 2.5^\circ$ 栅格模拟数据集 (1992–2020)

侯炜烨¹, 金佳鑫^{1,2*}, 严涛¹, 刘颖¹

1. 河海大学水文水资源学院, 南京 211100;

2. 国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心, 北京 100101

摘要: 二氧化碳 (CO_2) 是大气中主要温室气体之一, 对全球气候变化具有重要影响, 其浓度变化以及时空分布受到广泛关注。本文以 CO_2 浓度作为研究对象, 以 2002–2012 年全球对流层 CO_2 浓度产品 (AIR \times 3C2M 005) 为数据源, 对改进的 CO_2 浓度正弦估算模型进行逐像元参数率定与模拟, 得到 1992–2020 年全球 $2^\circ \times 2.5^\circ$ 分辨率的 CO_2 浓度月均值数据集, 并利用站点观测数据对产品精度进行验证与分析。研究表明: (1) 本文数据集与站点观测的 CO_2 浓度数据一致性较高, 在拟合 (2002–2012: $R^2 = 0.94$, $\text{RMSE} = 1.34 \text{ ppm}$)、回溯 (1992–2001: $R^2 = 0.92$, $\text{RMSE} = 1.50 \text{ ppm}$) 以及预测 (2013–2019: $R^2 = 0.93$, $\text{RMSE} = 1.58 \text{ ppm}$) 方面表现良好。(2) 本数据集显示全球大气 CO_2 浓度具有明显的空间异质性, CO_2 浓度高值区域主要位于北美洲北部, 低值区域主要位于南半球中纬度地区。该数据集具有全球尺度、时序长、精度高等优点, 可在一定程度上改进全球变化模拟中使用单一站点数值表征全球 CO_2 浓度的不足, 为地理学、生态学等学科相关研究提供数据支持。

关键词: 二氧化碳; 遥感; 模拟; AIRS; 全球

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.02.04>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.02.04>

数据可用性声明:

本文关联数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2021.11.01.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.11.01.V1>.

1 前言

全球经济快速发展, 化石燃料的大量使用导致二氧化碳排放量大幅增加, 对全球气候、生态系统和经济领域等方面造成很大影响。IPCC (the Intergovernmental Panel on Climate Change) 第五次评估报告 (IPCC AR5) 指出二氧化碳和甲烷是全球变暖的主要贡献者 (约

收稿日期: 2021-11-16; 修订日期: 2021-12-31; 出版日期: 2022-06-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2018YFA0605402); 国家自然科学基金 (41971374)

*通讯作者: 金佳鑫 ABE-5925-2021, 河海大学, 国家科技基础条件平台-国家地球系统科学数据中心, jiaxingking@hhu.edu.cn

数据引用方式: [1] 侯炜烨, 金佳鑫, 严涛等. 全球大气二氧化碳浓度 $2^\circ \times 2.5^\circ$ 栅格模拟数据集 (1992–2020) [J/DB/OL]. 全球变化数据学报, 2022, 6(2): 191–199. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.02.04>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.02.04>.
[2] 侯炜烨, 金佳鑫, 严涛等. 全球大气二氧化碳浓度 $2^\circ \times 2.5^\circ$ 栅格模拟数据集 (1992–2020) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.11.01.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.11.01.V1>.

占 88%–90%)^[1], CO₂ 作为重要的温室气体,其浓度的增加对地面有显著的加热作用^[2,3],受到政府部门以及科学界的广泛关注。探究二氧化碳的变化,回溯、预测全球不同地区二氧化碳浓度的变化,对于我们采取针对性的政策和措施来应对全球气候变化问题,实现社会经济的可持续发展具有重大的现实意义。

目前获取 CO₂ 观测数据主要有三种途径:地面站点观测、空基观测以及卫星遥感观测^[4]。地面站点观测数据时间跨度大,观测精度高,可作为卫星观测数据的基准。已有较多成功应用,使用单一站点表征全球 CO₂ 浓度,取得较好效果。然而,考虑到 CO₂ 分布的空间异质性,不足以表达全球范围真实情况。此外,地面观测点有很多限制,通常设置在人烟稀少的地方,地形复杂,建设难度高,维护成本高,覆盖范围较小,分布十分不均,需要很多站点协作才能探寻 CO₂ 的动态变化规律^[5,6],虽然能高精度测量 CO₂,但对于获取全球范围二氧化碳浓度数据具有一定的局限性,只能获取站点位置相对准确的 CO₂ 数据。空基探测使用飞机或热气球对地球系统研究实验室(Earth System Research Laboratory, ESRL)规定的区域进行大气 CO₂ 测量,能够实时探测高空尤其是对流层中上层乃至平流层^[7,8],相较于站点观测可以获取空间覆盖范围更广的 CO₂ 测量数据,但其设备成本高昂且时效性低,无法长期连续获取数据。卫星遥感探测通过搭载在卫星上的各种传感器来获取大气 CO₂ 中由太阳辐射并经过地面反射回太空的光谱特征,能在为大陆和海洋提供时间序列长且连续、时空一致性较好的、精度较高的对流层 CO₂ 观测数据^[9],基于该方面的研究成果得到了学术界的广泛认同。目前国内外学者用于研究大气 CO₂ 的数据资料很多来自于大气红外探测器(The Atmospheric Infrared Sounder, AIRS),其拥有 2,378 个连续的红外光谱通道(3.7–15.4 μm),观测准确的陆地、海洋和大气的红外光谱数据,提供高光谱高精度大气温湿度资料及云、地表、二氧化碳等参数资料^[10],Divakarla 等人将 AIRS 资料与探空观测资料比较发现陆地和海洋两者的相对误差均不超过 10%^[11]。然而,地表 CO₂ 输送至大气对流层的过程需要一定时间,造成 AIRS 反演的数据一定程度上滞后,其卫星 CO₂ 数据产品在近红外光谱进行反演,这个过程受到地表大气气溶胶的强烈干扰,导致 AIRS 反演的全球 CO₂ 数据在对流层中低层可信度较高^[12],而地表处反演的 CO₂ 数据精度较低,亟需研制一套全球尺度、长时序、高精度的二氧化碳浓度数据,为全球变化研究提供数据支撑。

针对上述不足,本研究利用 AIRS 卫星遥感数据作为数据源构建模型,模拟得到全球不同年份 CO₂ 月平均浓度数据。首先,为了证明卫星遥感数据可以真实反映对流层 CO₂ 的浓度,使用地面站点观测数据对卫星遥感反演数据进行质量验证,检验卫星观测的 CO₂ 数据与地面观测数据是否保持良好的一致性,以便将卫星遥感数据作为研究 CO₂ 时序分布的依据。其次,基于改进的正弦模型,逐像元进行模型参数化,并进行全球 CO₂ 模拟,并以站点数据以及卫星数据作为参考验证,为全球二氧化碳变化提供数据参考。

2 数据集元数据简介

《全球大气二氧化碳浓度 2°×2.5°栅格模拟数据集(1992–2020)》^[13]元数据信息见表 1。

表 1 《全球大气二氧化碳浓度 2°×2.5°栅格模拟数据集（1992–2020）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	全球大气二氧化碳浓度 2°×2.5°栅格模拟数据集（1992–2020）
数据集短名	GlobalSimulatedCO2_1992-2020
作者信息	侯炜烨 ABE-5925-2021, 河海大学, houhh5425@163.com 金佳鑫 ABE-5853-2021, 河海大学, jiaxing@hhu.edu.cn 严涛 ABE-5824-2021, 河海大学, 191309010014@hhu.edu.cn 刘颖 ABE-5924-2021, 河海大学, 201301060011@hhu.edu.cn
地理区域	60°S–88°N, 180°W–180°E
数据年代	1992–2020
时间分辨率	1992–2020 年逐月 CO ₂ 浓度值；1992–2020 年 CO ₂ 年均值
空间分辨率	2°×2.5°（纬度×经度）
数据格式	.nc 数据量 23.9 MB（压缩后）
数据集组成	(1) 1992–2020 年全球逐月 CO ₂ 浓度均值数据集（每年 12 个月存储为一个文件） (2) 1992–2020 年全球逐年 CO ₂ 浓度均值数据集
基金项目	中华人民共和国科学技术部（2018YFA0605402）；国家自然科学基金（41971374）
数据计算环境	MATLAB
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
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）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据集和通过《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 ^[14]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

3 数据研发方法

3.1 基础数据

本文采用 AIRS 和 AMSU（the Advanced Microwave Sounding Unit）联合反演的 2002–2012 年对流层 CO₂ 数据产品（AIR×3C2M 005）作为生产全球 CO₂ 浓度数据集的参考数据。大气红外探测仪 AIRS 搭载在 Aqua 卫星上，AIRS/AMSU/HSB（the Humidity Sounder for Brazil）是一套先进的从红外到微波波段探测的大气垂直廓线的观测仪，用于测量大气温度、提供大气的水汽分布信息，云、海以及陆地温度及大气湿度数据^[15]。本文采用的三级 CO₂ 月平均数据，数据版本为 version 5，数据空间覆盖范围为 60°S–90°N，空间分辨率为 2°×2.5°（纬度×经度），数据下载自 NASA 官方数据平台 GES DISC（Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center）。此外，采用 AIRS 数据反演的 2010–2017 年对流层 CO₂ 数据产品（AIRS3C2M 005），用于比较拟合数据和卫星数据与站点数据之间的一致性。

本研究采用站点 CO₂ 月平均数据对 AIRS 遥感数据以及本文产品进行分析与验证。具

体选取了 Samoa (SMO)、Mouna Loa (MLO)、瓦里关 (WLG)、Asserkrem (ASK)、Niwot Ridge (NWR)、Monte Cimone (CMN)、Plateau Rose (PRS) 7 个站点, 数据来源于世界温室气体数据中心 WDCGG (World Data Center for Greenhouse Gases)。全球 CO₂ 月平均数据下载自美国国家海洋和大气管理局全球监测实验室 (National Oceanic and Atmospheric Administration Global Monitoring Laboratory, NOAA GML)。

3.2 算法原理

本文参考 NOAA GML 碳循环小组提出的改进的正弦模型^[15]对 AIRS 遥感数据进行模拟与数据生产, 该模型可以减少由于天气尺度大气变异性 and 测量时间间隙导致的全球估计值确定过程中产生的噪声。

NOAA GML 碳循环小组使用全球空气采样网络^[16]的每周空气样本数据计算全球平均表面值^[17-20], 其样本来自大气混合程度良好的海洋边界层 (marine boundary layer, MBL), 其空气可以代表大量空气, 该数据可以低噪声地反映全球趋势, 无需大气传输模型就可以直接从数据中进行估计。全球 CO₂ 浓度呈现上升趋势, 并随季节变化而波动, 所以 NOAA GML 相关人员选取二次函数以及正弦、余弦函数的组合来代表适合 MBL 数据的平滑曲线, 该模型的具体参数随气体种类、站点和采样频率的变化而变化, 计算方式如下:

$$f(t) = a_1 + a_2 t + a_3 t^2 + \sum_{k=1,4} [b_{2k-1} \sin(2\pi kt) + b_{2k} \cos(2\pi kt)] \quad (1)$$

式中, t 为时间, 模型包含三个多项式参数 a_1 、 a_2 、 a_3 和八个正弦余弦谐波参数 b_{2k-1} 和 b_{2k} ($k=1, 2, 3, 4$), 以 2002–2012 年全球对流层 CO₂ 浓度 (ppm) 产品 (AIR×3C2M 005) 为数据源, 用改进的 CO₂ 浓度正弦估算模型进行逐像元参数率定, 每个像元对应一组包含 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_{2k-1} 和 b_{2k} ($k=1, 2, 3, 4$) 十一个参数的数据集, 进行逐像元的 CO₂ 浓度模拟。

将该模型应用到 AIRS+AMSU 卫星数据产品中, 检验模拟结果和卫星数据之间的一致性, 确定该模型是否同样适用于卫星数据。将 AIRS+AMSU 卫星数据产品输入模型, 逐像元进行参数率定, 得到 60°S–88°N 范围内每个像元对应的模型参数, 逐像元进行模拟, 计算得到该范围 CO₂ 浓度数据集。为了分析 1992–2020 年间 CO₂ 浓度年际变化趋势, 利用泰尔-森斜率估计器 (Sen's slope) 对全球 CO₂ 浓度年均值的的增长趋势进行估计, 通过选择成对点的所有线的斜率的中值作为斜率代表, 可以计算变化趋势, 减少异常值带来的不确定性。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

数据集主要包括两个子集:

(1) 1992–2020 年全球逐月 CO₂ 浓度均值数据集, CO2_mon_****, 其中, ****表示相应的年份;

(2) 1992–2020 年全球逐年 CO₂ 浓度均值数据集, CO2_mean_****, 其中, ****表示相应的年份。

4.2 数据结果

1992–2020 年间月平均 CO_2 浓度数据可视化如图 1 所示。总的来说， CO_2 的分布存在较为明显的空间异质性，北半球 CO_2 浓度普遍高于南半球。 CO_2 浓度较高的区域主要分布在北美洲北部、亚洲东部以及南北半球低纬度地区， CO_2 浓度较低的区域主要分布在南半球中、高纬度地区以及西伯利亚部分地区。

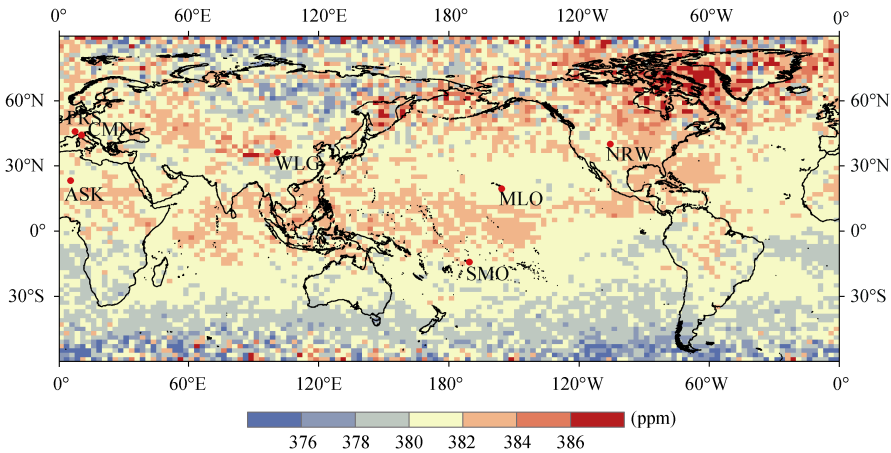


图 1 1992–2002 年全球 CO_2 平均浓度分布

1992–2020 年全球年平均 CO_2 浓度变化情况的年际变化趋势可视化结果如图 2 所示。全球 CO_2 浓度不断增加，其变化情况存在空间异质性，总体而言，北半球 CO_2 浓度的增长速度大于南半球。西伯利亚地区、北美洲北部等北半球高纬度地区 CO_2 浓度的增长速度较快，增长速度较慢的区域主要位于南美洲北部、非洲中部以及南北半球低纬度海洋地区。

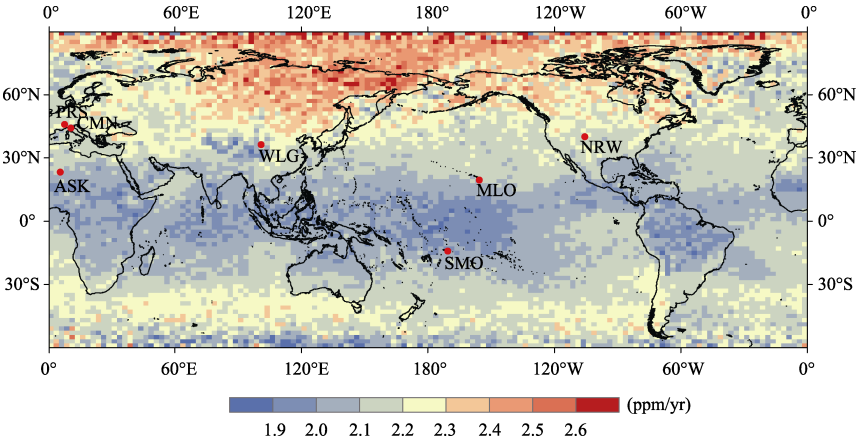


图 2 1992–2020 年全球年平均 CO_2 浓度年际变化趋势

4.3 数据结果验证

4.3.1 拟合结果与站点数据比较

为了证明模型拟合结果确实能真实反映地面 CO_2 的浓度，将 1992–2019 年七个站点观

测得到的 CO₂ 数据与模拟结果相比较，结果显示两者具有明显的线性关系，表现出很好的一致性。通过分别计算回溯阶段（1992–2001）、模拟阶段（2002–2012）以及预测阶段（2013–2019）七个站点模型模拟结果与站点二氧化碳浓度数据之间的月相关系数、RMSE 以及平均相对误差，得到的结果显示本数据集与地面真实 CO₂ 浓度在回溯、模拟和预测阶段具有较好的一致性。相较之下，模拟阶段与站点观测数据之间的误差最小，RMSE 控制在 5 ppm 以内，可以很好的表征地面 CO₂ 浓度。

4.3.2 拟合结果、卫星数据与站点数据比较

采用 2010 年 1 月 1 日至 2017 年 2 月 1 日的 AIRS 反演数据作为对比数据，分别计算模拟数据和站点观测数据以及卫星数据和站点观测数据之间的相关系数 r 、RMSE、相对误差、 R^2 等，得到七个站点拟合结果与站点真实 CO₂ 月平均数据的一致性普遍优于 AIRS 反演得到的 CO₂ 数据，本数据集能很好地表现真实 CO₂ 浓度。

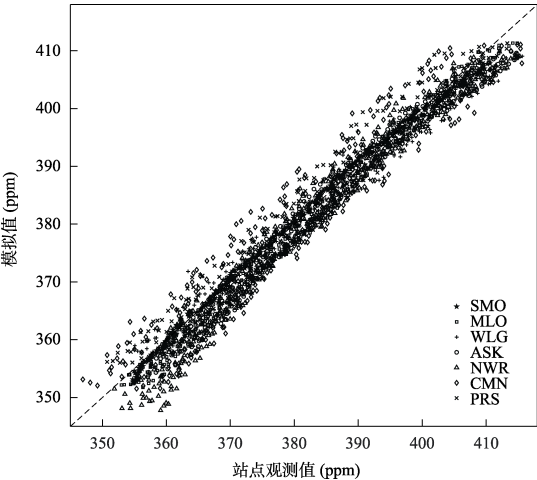


图 3 站点观测 CO₂ 混合比浓度与模型模拟 CO₂ 月平均浓度结果比较
(注：站点分别是 SMO, Samoa; MLO, Mouna Loa; WLG, 瓦里关; ASK, Asserkrem; NWR, Niwot Ridge; CMN, Monte Cimone; PRS, Plateau Rose, 下同)

站点	均值 (ppm)		均差 (ppm)	月相关系数	RMSE (ppm)	平均相对误差
	站点值	拟合值				
SMO	362.88	362.78	0.10	0.994,4	0.91	0.20%
MLO	364.33	361.73	2.60	0.969,0	2.98	0.72%
WLG	365.86	362.96	2.90	0.845,8	2.71	0.63%
ASK	367.39	359.97	7.43	0.922,5	3.67	0.87%
NWR	364.78	360.58	4.20	0.913,4	5.22	1.22%
CMN	364.22	362.98	1.24	0.772,7	4.83	1.21%
PRS	364.65	363.64	1.02	0.877,7	2.94	0.69%

表 3 2002–2012 模拟阶段站点观测月平均 CO₂ 混合比数据与模拟结果比较

站点	均值 (ppm)		均差 (ppm)	月相关系数	RMSE (ppm)	平均相对误差
	站点值	拟合值				
SMO	381.79	382.70	−0.91	0.997,3	0.90	0.21%
MLO	383.66	382.00	1.66	0.970,6	2.21	0.49%
WLG	383.63	382.57	1.05	0.944,3	2.58	0.57%
ASK	383.42	382.78	0.64	0.954,7	1.99	0.46%
NWR	384.22	383.58	0.64	0.916,2	2.64	0.61%
CMN	383.23	384.22	−0.99	0.780,6	4.65	1.06%
PRS	383.69	383.78	−0.10	0.884,9	3.04	0.67%

表 4 2013–2019 预测阶段站点观测月平均 CO₂ 混合比数据与模拟结果比较

站点	均值 (ppm)		均差 (ppm)	月相关系数	RMSE (ppm)	平均相对误差
	站点值	拟合值				
SMO	400.63	399.92	0.70	0.996,1	1.39	0.28%
MLO	402.97	401.88	1.09	0.968,8	1.86	0.40%
WLG	402.99	400.44	2.55	0.925,0	3.68	0.78%
ASK	402.78	400.85	1.93	0.951,1	3.00	0.61%
NWR	403.43	401.91	1.52	0.898,8	3.31	0.71%
CMN	403.37	402.75	0.62	0.718,9	5.02	1.09%
PRS	401.35	403.87	−2.52	0.832,3	3.65	0.68%

5 讨论和总结

全球大气 CO₂ 浓度呈现逐年上升的趋势，但其上升的速率受工业发展水平等因素的影响并不稳定，本文考虑了 CO₂ 浓度长时序的非线性变化，而本研究所使用的模型在用于描述人为活动引起的 CO₂ 突变方面能力相对有限，在回溯过程中可能会出现模拟结果和站点观测结果偏差较大的情况，因此有必要确定一个时间点来确保回溯结果与站点观测结果保持良好的一致性。全球 CO₂ 分布存在空间异质性，但各个地区 CO₂ 增长趋势与全球平均表面值趋于一致。因此，采用全球平均表面值（1980–2019 年）作为参考数据，自 1985 年起，逐年选取为转折年份（即分段点），前后时间分别进行利用模型进行参数率定与模拟评价，确保分段点前后的模拟数据组合与全球平均表面值具有最好的一致性。经检验，以 1992 年为分段点时，模拟结果 R^2 最高（0.999,5）、RMSE 最低（0.451 ppm）。因此，本数据集以 1992 年为数据集起始年份。

本数据集以 AIRS 和 AMSU 联合反演的全球对流层 CO₂ 浓度产品作为参考数据，对改进的 CO₂ 浓度正弦估算模型进行逐像元参数率定与模拟，并利用站点观测数据对产品精度进行验证与分析，旨在生产全球尺度、时序长的 CO₂ 浓度数据集，为全球地理学、生态学等学科相关研究提供数据支持。数据集可视化显示，CO₂ 的分布存在较为明显的空间异质

性，北半球 CO₂ 浓度普遍高于南半球。在北半球，CO₂ 浓度较高的区域主要分布在中、高纬度地区，浓度较低的区域出现在低纬度地区。该数据集与站点观测数据进行对比发现两组数据在回溯、模拟和预测均具有较好的一致性，能很好地表征全球 CO₂ 的时空分布特征，长时序的对全球二氧化碳进行估计。相比于卫星遥感数据，本数据集可以用于研究更长时序的大气二氧化碳浓度变化，并且可在一定程度上改进全球变化模拟中使用单一站点数值表征全球 CO₂ 浓度的不足，为地理学、生态学等学科相关研究提供数据支持。

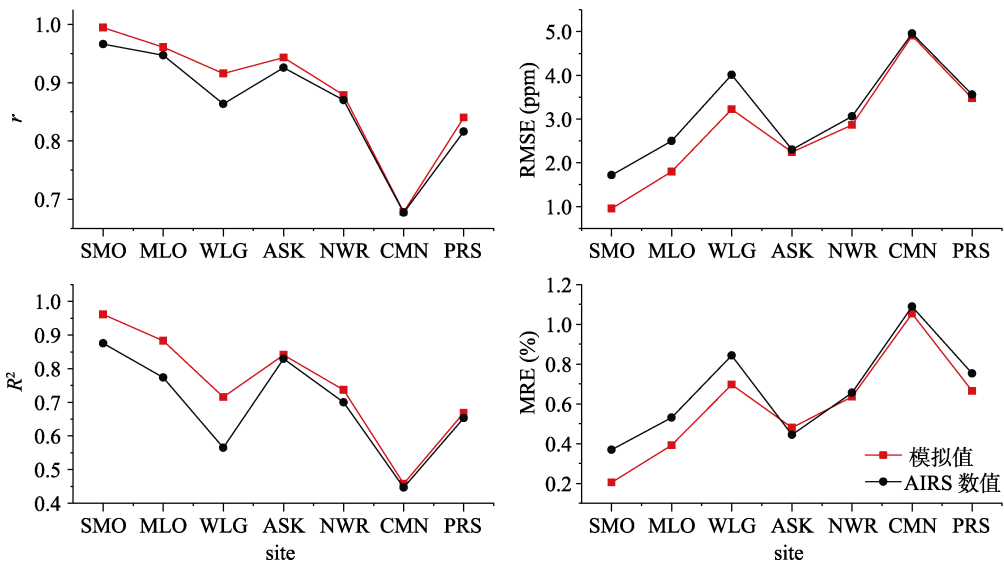


图4 拟合结果、卫星数据产品与站点观测数据一致性比较

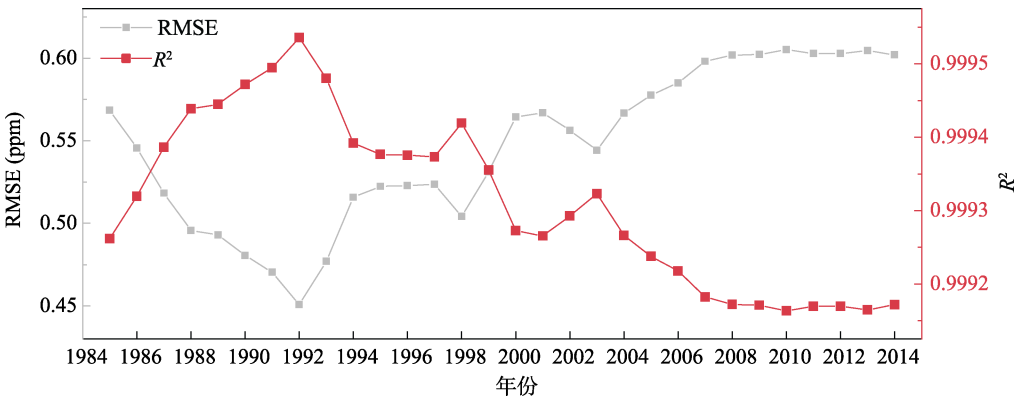


图5 不同年份作为转折点前后模拟结果与全球观测数据一致性比较

作者分工：金佳鑫对数据集的开发做了总体设计；侯炜烨采集、处理数据以及撰写论文；严涛设计了模型和算法代码；刘颖进行了数据验证。

利益冲突声明：本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

[1] Hartmann, D. L., Klein Tank, A. M. G., Rusticucci, M., *et al.* IPCC Climate Change 2013: The Physical

- Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Callendar, G. S. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1938, 64(275): 223–240. DOI: 10.1002/qj.49706427503.
- [3] Bacastow, R. B. The effect of temperature change of the warm surface waters of the oceans on atmospheric CO_2 [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(2): 319–333.
- [4] Qianwen, M., Qiu, Y. Remote sensing analysis of multi-years spatial and temporal variation of CO_2 in China [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(2): 203–213.
- [5] Bergamaschi, P., Frankenberg, C., Meirink, J. F., *et al.* Inverse modeling of global and regional CH_4 emissions using SCIAMACHY satellite retrievals [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114: D22301. DOI: 10.1029/2009JD012287.
- [6] 石广玉, 戴铁, 徐娜. 卫星遥感探测大气 CO_2 浓度研究最新进展[J]. 地球科学进展, 2010(1): 7–13.
- [7] Menzel, W. P., Schmit, T. J., Zhang, P., *et al.* Satellite-based atmospheric infrared sounder development and applications [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(3): 583–603. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0293.1.
- [8] Machida, T., Matsueda, H., Sawa, Y., *et al.* Worldwide measurements of atmospheric CO_2 and other trace gas species using commercial airlines [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2008, 25(10): 1744–1754. DOI: 10.1175/2008JTECHA1082.1.
- [9] 刘毅, 吕达仁, 陈洪滨等. 卫星遥感大气 CO_2 的技术与方法进展综述[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 247–254.
- [10] Kuze, A., Suto, H., Nakajima, M., *et al.* Thermal and near infrared sensor for carbon observation Fourier-transform spectrometer on the Greenhouse Gases Observing Satellite for greenhouse gases monitoring [J]. *Applied optics*, 2009, 48(35): 6716–6733. DOI: 10.1364/AO.48.006716.
- [11] Divakarla, M. G., Barnet, C. D., Goldberg, M. D., *et al.* Validation of Atmospheric Infrared Sounder temperature and water vapor retrievals with matched radiosonde measurements and forecasts [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2006, 111: D09S15. DOI: 10.1029/2005JD006116.
- [12] 周曼蒂. 对流层 CO_2 浓度卫星遥感反演及误差分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
- [13] 侯炜烨, 金佳鑫, 严涛等. 全球大气二氧化碳浓度 $2^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 栅格模拟数据集 (1992–2020) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.11.01.V1>.
- [14] 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]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017 年更新).
- [15] Thoning, K. W., Tans, P. P., Komhyr, W. D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa observatory 2. analysis of the NOAA GMCC Data, 1974–1985 [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1989, 94(D6): 8549–8565.
- [16] Fetzer, E., Mcmillin, L. M., Tobin, D., *et al.* AIRS/AMSU/HSB validation [J]. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 2003, 41(2): 418–431. DOI: 10.1109/TGRS.2002.808293.
- [17] Conway, T. J., Tans, P. P., Waterman, L. S., *et al.* Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration/Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory global air sampling network [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D11): 22831–22855. DOI: 10.1029/94JD01951.
- [18] Dlugokencky, E. J., Steele, L. P., Lang, P. M., *et al.* The growth rate and distribution of atmospheric methane [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1994, 99(D8): 17021–17043. DOI: 10.1029/94JD01245.
- [19] Novelli, P. C., Steele, L. P., Tans, P. P. Mixing ratios of carbon monoxide in the troposphere [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1992, 97(D18): 20731–20750. DOI: 10.1029/92JD020.
- [20] Troler, M., White, J. W. C., Tans, P. P., *et al.* Monitoring the isotopic composition of atmospheric CO_2 : Measurements from the NOAA Global Air Sampling Network [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D20): 25897–25916. DOI: 10.1029/96JD02363.