



净零排放对中国大气二氧化碳浓度的影响 ——基于GEOS-Chem模型的理想模拟

谭景焯^{1,2}, 王军^{1,2*}, 毛慧琴³, 王恒茂^{1,2}, 刘志强⁴, 王美蓉^{5,6}, 阎然^{1,2}, 王训梅^{1,2}, 江飞^{1,2}

1. 南京大学地球关键物质循环前沿科学中心, 国际地球系统科学研究所, 南京 210023
2. 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏省地理信息科学与技术重点实验室, 自然资源部陆地卫星遥感应用重点实验室, 南京 210023
3. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094
4. 重庆市气象科学研究所, 中国气象局气候资源经济转化重点开放实验室, 重庆 401147
5. 南京信息工程大学气候系统预测与变化应对全国重点实验室, 气象灾害教育部重点实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044
6. 西藏自治区气象局, 墨脱大气水分循环西藏自治区野外科学观测研究站, 日喀则和墨脱国家气象观测台, 拉萨 850000

* 通讯作者, E-mail: wangjun@nju.edu.cn

收稿日期: 2024-06-01; 收修改稿日期: 2024-11-08; 接受日期: 2024-12-26; 网络版发表日期: 2025-02-11

国家重点研发计划项目(2022YFB3904801)、国家自然科学基金项目(42475129)、江苏省自然科学基金项目(BK20221449)、西藏自治区科技创新基地建设项目(XZ202401YD0008)和国家重大科技基础设施项目(2023-EL-ZD-00022)资助

摘要 大气中二氧化碳(CO₂)浓度的升高已引起全球气候变化, 例如全球变暖及更频繁的极端气候事件. 为控制CO₂浓度的持续上升, 各国相继提出“碳中和”目标. 为了研究中国“碳中和”目标对大气中CO₂浓度的影响, 本文利用三维化学传输模型GEOS-Chem进行了2015~2019年的一系列理想模拟. 与碳观测卫星(OCO-2)的CO₂柱浓度(XCO₂)及ObsPack地面CO测量数据对比发现, GEOS-Chem模型能有效再现CO₂的时空变化, 模型在中国区域内对OCO-2 XCO₂的均方根误差(RMSE)为1.51ppm($R^2=0.89$), 对WLG站地面CO₂浓度的RMSE为2.65ppm($R^2=0.75$). 此外, 与中国XCO₂在正常排放情况下2.83ppm a⁻¹的上升趋势相比, 中国的净零CO₂排放使XCO₂的上升趋势减缓至1.81ppm a⁻¹, 下降幅度约为35.89%. 同时, XCO₂的季节循环振幅(SCA)从(7.39±0.81)ppm降至(6.75±0.70)ppm, 相对下降9.91%. 从空间分布上, 净零CO₂排放使华北和华南地区引起了XCO₂趋势的显著下降, 而对SCA的影响则主要在华北和东北地区. 此外, 理想试验显示, 化石燃料CO₂零排放使XCO₂的线性趋势降低了40.81%, 而缺少陆地CO₂汇则使SCA显著减少16.61%. 地面CO₂浓度的趋势和SCA对净零CO₂排放的响应与XCO₂相似, 但表现出更高的敏感性. 总体而言, 本研究强调了我国“碳中和”目标在缓解全球变暖中的潜力, 并指出全球各国需加强合作, 共同应对气候变化.

关键词 XCO₂, GEOS-Chem, 碳中和, 净零排放, 地表CO₂浓度

中文引用格式: 谭景焯, 王军, 毛慧琴, 王恒茂, 刘志强, 王美蓉, 阎然, 王训梅, 江飞. 2025. 净零排放对中国大气二氧化碳浓度的影响——基于GEOS-Chem模型的理想模拟. 中国科学: 地球科学, 55, doi: 10.1360/N072024-0163

英文引用格式: Tan J, Wang J, Mao H, Wang H, Liu Z, Wang M, Yan R, Wang X, Jiang F. 2025. Impact of net-zero emissions on atmospheric CO₂ concentration in China: Ideal simulations based on the GEOS-Chem model. Science China Earth Sciences, <https://doi.org/10.1007/s11430-024-1502-y>

1 引言

持续来自化石燃料燃烧和水泥制造等人类活动(Höök和Tang, 2013; He等, 2022)的温室气体排放, 使大气中二氧化碳(CO₂)浓度从工业化前的280ppm上升到2022年的约417.9ppm(WMO, 2023; 1ppm=10mg L⁻¹). 大气CO₂浓度的增加加剧了温室效应, 引发全球变暖, 导致地表温度上升了1.07℃(IPCC, 2021; Jeffry等, 2021; Ponce和Khan, 2021). 温室气体排放还增加了如热浪、干旱、野火、降水和洪水等极端天气事件和复合灾害的发生频率和强度(AghaKouchak等, 2020; Laufkötter等, 2020; Gampe等, 2021), 对人类健康、经济稳定和生态平衡等均构成威胁(Zhang和Zhou, 2020; Vicedo-Cabrera等, 2021).

目前, 大气CO₂浓度的监测和研究主要通过三种方法进行: 卫星空间监测、地面站观测和模型模拟(Jin等, 2022). 卫星空间监测可以从全球视角准确观测大气CO₂的季节循环和空间分布, 具有足够的精度、覆盖范围和分辨率. 温室气体观测卫星(Greenhouse Gases Observing Satellite, GOSAT)、轨道碳观测站-2(Orbiting Carbon Observatory-2, OCO-2)和轨道碳观测站-3(Orbiting Carbon Observatory-3, OCO-3)提供的大气CO₂柱浓度(XCO₂)数据已被广泛用于大气CO₂浓度变化的研究中(Chatterjee等, 2017; Eldering等, 2017; Wang等, 2020; Li等, 2022; Feldman等, 2023). 地基观测, 如总碳柱观测网络(Total Carbon Column Observing Network, TCCON)和观测数据包框架(Observation Package framework, ObsPack), 则提供了地面CO₂浓度的精确测量. 然而, 地面观测站数量有限, 限制了对地面浓度的全面分析(Zhang等, 2017). 虽然天基监测和地面站观测能有效跟踪大气中CO₂浓度的变化, 但它们无法区分人为排放源和自然排放源. 模型模拟方法通过控制和约束输入数据, 可以解决这一局限性, 全球三维化学传输模型(the Goddard Earth Observing System Chemistry global 3D chemistry transport model, GEOS-Chem)等模型在这方面发挥了至关重要的作用(Messerschmidt等, 2013; Allahudheen等, 2023).

此外, 为了减缓全球变暖, 各国签署了《巴黎协定》(The Paris Agreement), 该协定旨在将全球气温升幅限制在远低于2℃的范围内, 并力求将升温幅度限制在1.5℃(Rogelj等, 2016; Roelfsema等, 2020). 为了实现

这一愿景, CO₂排放需要达到排放源和碳汇之间的平衡, 即净零排放或碳中和(Fuglestedt等, 2018; Rogelj等, 2019). 在此情景下, 全球已有超过100个国家设定或正在考虑实现净零排放或碳中和目标(van Soest等, 2021). 例如, 美国和欧盟都计划到2050年实现温室气体净零排放(Salvia等, 2021; Williams等, 2021). 中国是温室气体排放大国, 约占当前全球辐射强迫的10%±4%, 其中化石燃料燃烧产生的CO排放是其主要贡献来源, 估计达到(0.16±0.02)W m⁻²(Li等, 2016). 为了实现《巴黎协定》的目标, 中国将实施更严格的政策和措施, 确保CO₂排放在21世纪实现碳达峰和碳中和目标(张雅欣等, 2021; Dong等, 2022).

现有关于净零排放的研究主要侧重于技术和政策角度的路径和战略上, 例如能源转型以及碳捕集、利用和封存等(Chen等, 2022; Shang和Lv, 2023). 大多数大气CO₂浓度的分析侧重于其空间分布和时间变化(Keenan等, 2016; Su等, 2023; Liu等, 2024; Lou等, 2024). 然而, 区域性净零排放(如中国)对大气CO₂浓度的影响及其减少程度仍不明确. 在本研究中, 将采用GEOS-Chem模型进行理想模拟, 研究净零排放条件下XCO₂和地表CO₂浓度的变化. 我们的分析将聚焦于其趋势变化和季节循环振幅. 此外, 将通过敏感性实验定量评估区域化石CO₂排放和陆地CO₂汇各自对XCO₂的影响.

2 数据和方法

2.1 OCO-2 XCO₂产品

本研究使用OCO-2卫星的空间测量大气XCO₂数据, 该卫星于2014年7月发射. OCO-2项目由三个高分辨率光谱仪组成, 可同时测量1.61和2.06μm附近的近红外CO₂波段以及0.76μm的氧分子A波段的太阳光反射信号. 该卫星在当地时间下午1:36左右过境, 具有16天或233轨道的近似重复观测周期. OCO-2以天底、闪烁和目标三种模式进行观测, 第一年之后, 除对太平洋和大西洋大部分地区进行闪烁观测外, 在所有轨道上交替进行天底/闪烁观测. 本研究使用OCO2_L2_Lite_FP数据集的第11版(OCO2_L2_Lite_FP_dataset version 11)(Kiel等, 2019), 其空间分辨率为2.25km×1.29km, 数据涵盖了2015-01-01至2019-12-31的时间段, 其中2017-08-01至2017-09-18的数据存在缺

失. 在本研究中, 保留天底和闪烁观测数据, 同时仅选择了质量标志为“良好”(QA=0)的数据. 为与GEOS-Chem模型的空间分辨率保持一致, 将卫星数据重新映射到 $2^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的经纬度网格中, 通过对每个网格单元内的观测值进行平均来完成数据重采样.

2.2 ObsPack地面CO₂浓度数据

本研究同时使用来源于ObsPack数据产品的CO₂地表观测数据(Masarie等, 2014; Schuldt等, 2022). ObsPack整合了来自不同采样平台的大气温室气体观测数据, 以1996年开始的GLOBALVIEW合作产品为蓝本, 旨在为碳循环模拟研究提供帮助. ObsPack数据集在中国境内有10个站点, 除去海洋和边境地区, 有6个站点的数据可供选择, 分别是WLG、LFS、LAN、XGL、JSA和SDZ站. 本研究依据方位、植被覆盖和人为排放强度选取了其中4个站点, 其他站点(JSA和SDZ站)见网络版附图S1(<http://earthcn.sciichina.com>). 站点的详细位置(经纬度)和观测时间信息见表1和图1b. 选取的这4个站点分别代表了中国不同区域的地表CO₂浓度: WLG站代表西部, LFS站代表北方, LAN站代表东部, XGL站代表西南部.

2.3 GEOS-Chem模型简介及其模拟试验设计

GEOS-Chem模型可以在广泛的时空尺度上模拟大气CO₂浓度. 本研究使用了GEOS-Chem版本13.2.0, 该版本通过线性经纬度网格整合了存档的GEOS气象数据, 以计算水平和垂直输送过程(Bukosa等, 2023). 本研究中气象驱动场来自MERRA-2再分析数据, 其中三维场的时间分辨率为3h, 二维场为1h. 以同化研究的结果(Wang等, 2019)为基础, 进行了为期1年的重启动, 以生成本研究所需的2015-01-01重启文件, 并在不改变模型参数设置的前提下, 使模式每小时输出1次1h平均值, 每月生成一个文件.

本研究使用协调排放组件(Harmonized Emissions Component, HEMCO)3.5.0版(Keller等, 2014; Lin等, 2021)中的部分排放数据以模拟大气中的CO₂浓度: 化石燃料排放数据来自人为二氧化碳开放源数据清单(Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂, ODIAC)(Oda和Maksyutov, 2011), 船舶排放数据来自通用教育数据标准(Common Education Data Standards, CEDS)(Hoesly等, 2018), 飞机排放数据来自飞机排放

清单代码(Aircraft Emissions Inventory Code 2019)(Olsen等, 2013), 火灾排放数据来自全球火灾排放数据库4.1s(Global Fire Emissions Database 4.1s, GFED 4.1s)(Randerson等, 2018). 此外, 本研究还使用了全球碳同化系统第二版(Global Carbon Assimilation System version 2, GCASv2)(Jiang等, 2021)优化后验产品中的陆地和海洋碳源汇数据. 图1显示了2015年化石CO₂排放量和陆地CO₂汇的年均分布, 其中中国的贡献尤为突出, 化石CO₂排放量约占全球的27.8%, 总计9.68Gt CO₂, 陆地CO₂汇约占全球的23.0%, 强度为1.68Gt CO₂, 表明中国化石CO₂排放量和陆地CO₂汇在全球碳收支中具有重要作用.

为了进一步研究净零CO₂排放对中国XCO₂的影响, 并更好地理解化石CO₂排放和陆地CO₂汇的各自贡献, 本研究设计了以下四组试验, 其中包括一组对照试验(标记为CTL)和三组敏感性试验(分别标记为EXP1、EXP2和EXP3).

(1) CTL: 2015~2019年, 所有碳排放和吸收均正常.

(2) EXP1: 2015~2019年, 中国化石CO₂排放和陆地CO₂汇的总碳通量为零.

(3) EXP2: 2015~2019年, 仅中国化石CO₂排放的碳通量为零.

(4) EXP3: 2015~2019年, 仅中国陆地CO₂汇的碳通量为零.

因此, EXP1-CTL可以阐明在理想的净零排放条件下, 中国地区净CO₂排放对XCO₂的影响. 同时, EXP2-CTL和EXP3-CTL分别描述了中国化石CO₂排放和陆地CO₂汇对XCO₂变化的影响. 本研究中试验的输出为72层CO₂浓度数据, 空间分辨率为 $2^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (纬度 \times 经度), 时间分辨率为1h. 为了便于与卫星观测到的XCO₂数据进行直接比较, 须将72层CO₂浓度转换为XCO₂.

由于GEO-Chem模型在垂直方向上使用了混合地形-气压(σ - p)坐标系, 首先利用MERRA-2的表面气压计算出每层中心点对应的实际气压值. 然后, 根据气压将GEO-Chem模型72层的CO₂浓度模拟结果插值到OCO-2的20层. 最后根据OCO-2的CO₂先验剖面数据、柱平均核函数和气压权重(Connor等, 2008)计算得到模型模拟的XCO₂结果. 具体GEOS-Chem模拟XCO₂的计算公式如下:

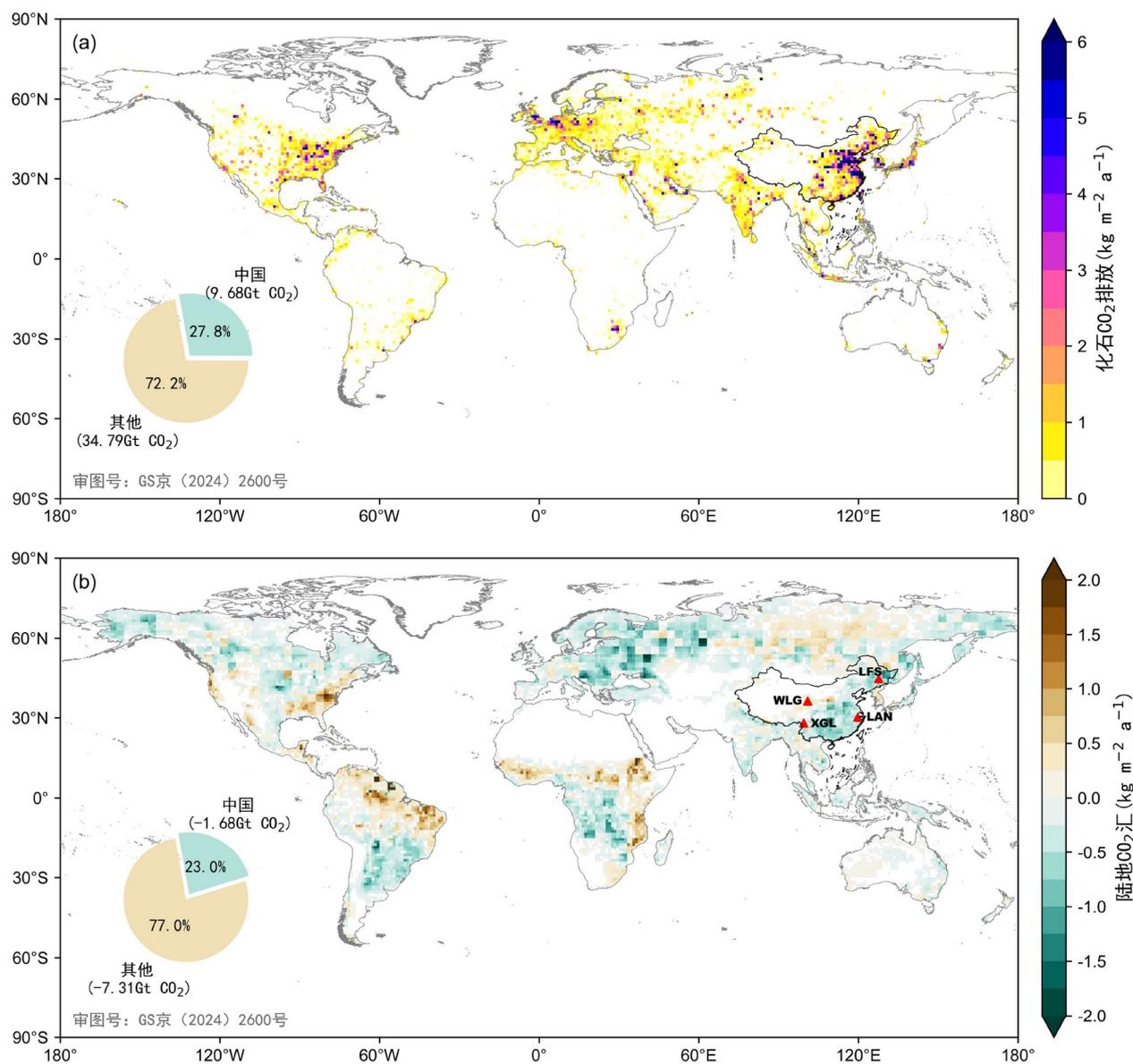


图 1 2015年化石CO₂排放量和陆地CO₂汇的输入数据

(a) 2015年ODIAC的化石CO₂年平均排放量; (b) 2015年GCAS优化的年平均陆地CO₂汇. 此外, (b)中的红色三角形显示了本研究使用的ObsPack观测站的位置

表 1 本研究使用的观测站信息

站点	地点	开始日期	结束日期	所在省份
WLJG	36.29°N, 100.90°E	1990-08-05	2021-12-29	青海省
LFS	44.73°N, 127.60°E	2009-01-01	2016-12-31	黑龙江省
LAN	30.30°N, 119.73°E	2009-01-02	2016-12-31	浙江省
XGL	28.01°N, 99.44°E	2010-08-02	2016-12-31	云南省

$$XCO_2 = pXCO_2 + \sum_j (h_j A_j (X_m - X_p)_j), \quad (1)$$

其中, $pXCO_2$ 是 XCO_2 先验值, h_j 是气压权重系数, A_j 是柱平均核函数, X_m 和 X_p 分别代表GEO-Chem模拟 CO_2 和先验剖面值. j 表示层数(总计20层).

2.4 大气 CO_2 浓度曲线拟合

大气 CO_2 浓度的变化主要包括短期波动、季节周期、年际、年代际以及长期趋势. 为了分析 CO_2 浓度的变化趋势和季节循环, 本研究基于曲线拟合算法对时间序列进行分解(Press等, 1988; Thoning等, 1989). 本研究使用的函数为

$$f(t) = a_0 + a_1 t + \sum_{n=1}^4 c_n [\sin(2n\pi t + \varphi_n)], \quad (2)$$

其中, 常数项 a_0 表示研究期间 XCO_2 的背景浓度; 一次项系数 a_1 表示线性趋势, 即 XCO_2 的增长率, 而其余谐波项则与季节周期有关. 该函数根据一般线性最小二乘回归算法对数据进行拟合, 并确定 a_0 、 a_1 和 c_n . 本研究通过平均谐波项振幅的峰谷差值计算得到季节循环振幅(Seasonal Cycle Amplitude, SCA). 同时, 时间序列的趋势是函数的多项式部分和残差的长期滤波.

3 结果

3.1 模型模拟性能

为了更好地分析净零 CO_2 排放对中国 CO_2 浓度的

影响, 首先评估了GEOS-Chem模型的模拟性能(图2). OCO-2卫星对 XCO_2 的观测结果显示, 中国上空的 XCO_2 从2015年的398ppm增加到2019年的412ppm, 呈明显上升趋势, 趋势斜率为 2.60ppm a^{-1} ($p < 0.01$). 此外, 卫星观测到的 XCO_2 呈现出明显的季节周期, 4月为最大值, 8月为最小值, SCA为 $(8.78 \pm 0.67)\text{ppm}$. 这种变化主要是由于生态系统在夏季光合作用超过呼吸作用, 吸收 CO_2 ; 而在冬季呼吸作用占主导地位, 释放 CO_2 . GEOS-Chem的 XCO_2 模拟结果也显示出了 2.83ppm a^{-1} ($p < 0.01$)的显著上升趋势和明显的季节周期, SCA为 $(7.39 \pm 0.70)\text{ppm}$, 与OCO-2观测结果基本一致. 比较GEOS-Chem XCO_2 模拟结果和OCO-2 XCO_2 观测结果, 两者关系接近1:1线, 实际斜率为0.95, 均方根误差(RMSE)为1.51ppm, 判定系数(R^2)为0.89, 表明模型模拟结果和观测结果高度一致.

此外, 将GEOS-Chem模拟的近地面 CO_2 浓度与ObsPack在四个观测站的地面观测数据进行了对比(图3), 发现在大气本底观测站WLG站观测到的 CO_2 浓度有明显的上升趋势(2.51ppm a^{-1} , $p < 0.01$), 并伴有明显的季节周期, 与卫星观测到的 XCO_2 相似. 模拟和观测到的地表 CO_2 浓度之间的RMSE为2.65ppm, R^2 为0.75. 与之相反, 在LFS、LAN和XGL站, 由于观测时间较短(数据截至2016年12月), 地表 CO_2 浓度没有表现出明显的趋势. 但是, LFS站的季节周期非常明显, RMSE为7.82ppm ($R^2 = 0.70$). 位于长江三角洲地区的LAN站则更加凸显了化石 CO_2 排放效应, 其季节循环较弱, RMSE为7.74ppm ($R^2 = 0.51$). 同时, 位于西南地区的XGL站的

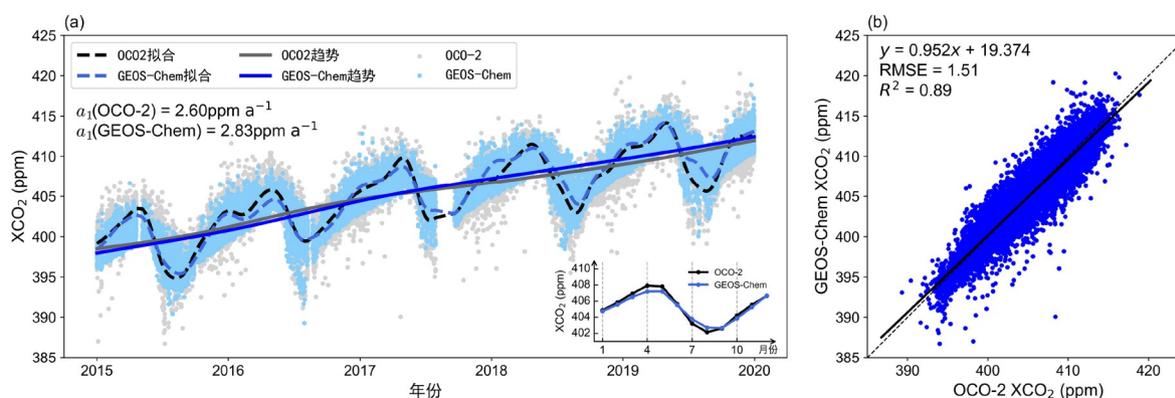


图2 GEOS-Chem模拟中国 XCO_2 与OCO-2 XCO_2 观测结果比较

(a) OCO-2观测结果(灰点和黑线)和GEOS-Chem模拟结果(蓝点和蓝线)的时间序列. 其原始值用点表示, 平滑拟合曲线用虚线表示, 趋势用实线表示. (a)中右下角子图表示OCO-2观测结果(黑线)和GEOS-Chem模拟结果(蓝线)的季节循环, 每月 XCO_2 为多年月平均值. (b) XCO_2 观测值和模拟值的散点图. XCO_2 的单位是ppm

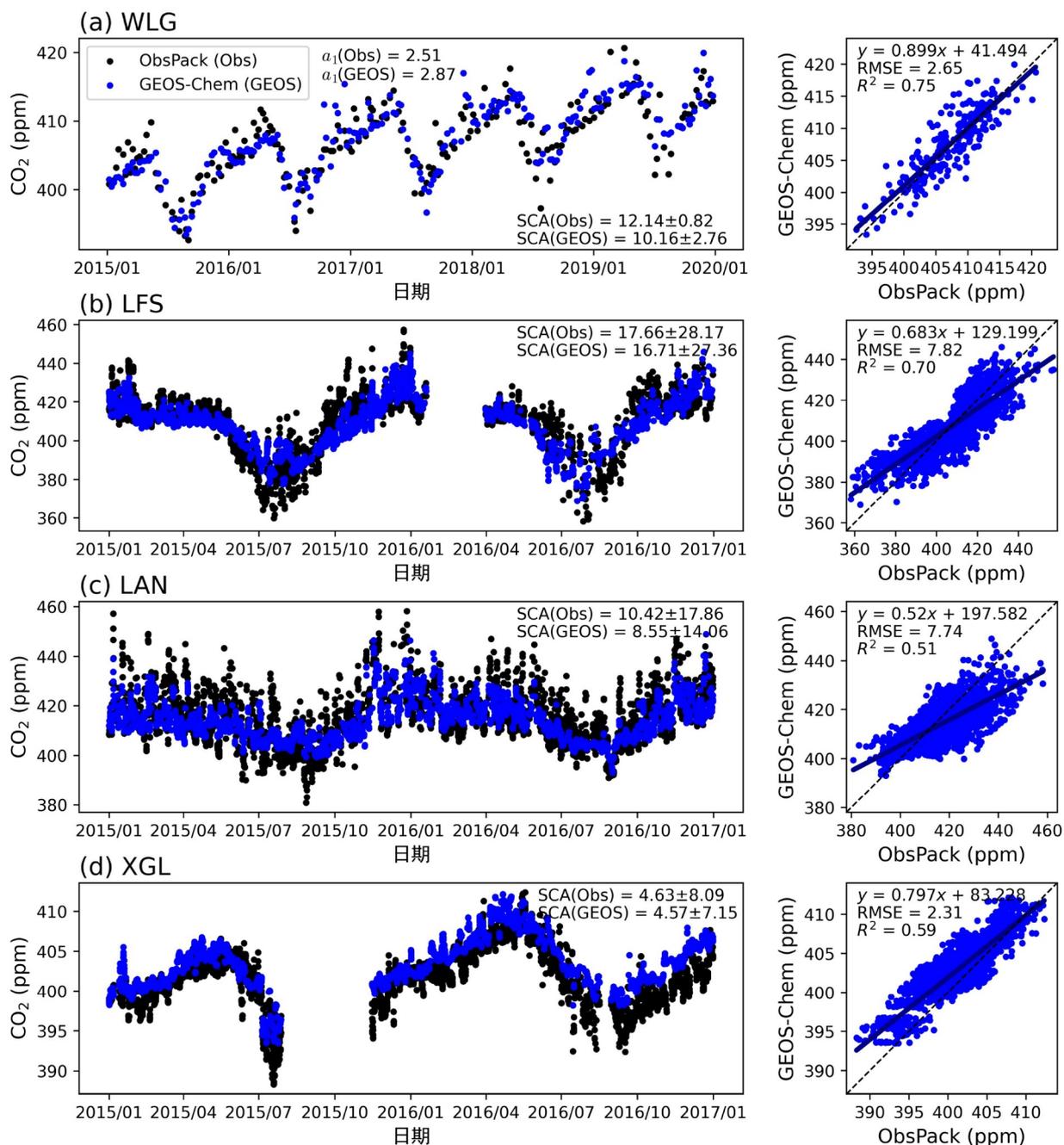


图3 GEOS-Chem模拟地面CO₂浓度与ObsPack中地面站WLG(a)、LFS(b)、LAN(c)和XGL(d)观测结果之间的比较。左栏显示的是GEOS-Chem模拟结果(蓝点)和ObsPack观测结果(黑点)的时间序列。右栏显示的是观测和模拟CO₂浓度之间的关系。斜率 a_1 的单位为ppm a⁻¹, SCA的单位是ppm

SCA最弱, 为(4.63±8.09)ppm, RMSE为2.31ppm ($R^2=0.59$)。总体而言, GEOS-Chem模型基本能准确地模拟出地面CO₂浓度, 但与XCO₂相比, 模拟地面CO₂浓度的RMSE偏大。

3.2 理想净零CO₂排放的影响

图4显示了中国在理想净零CO₂排放(EXP1)与CTL试验中XCO₂的变化。显然, 理想净零CO₂排放时中国XCO₂的上升趋势明显下降。定量地说, EXP1试验中

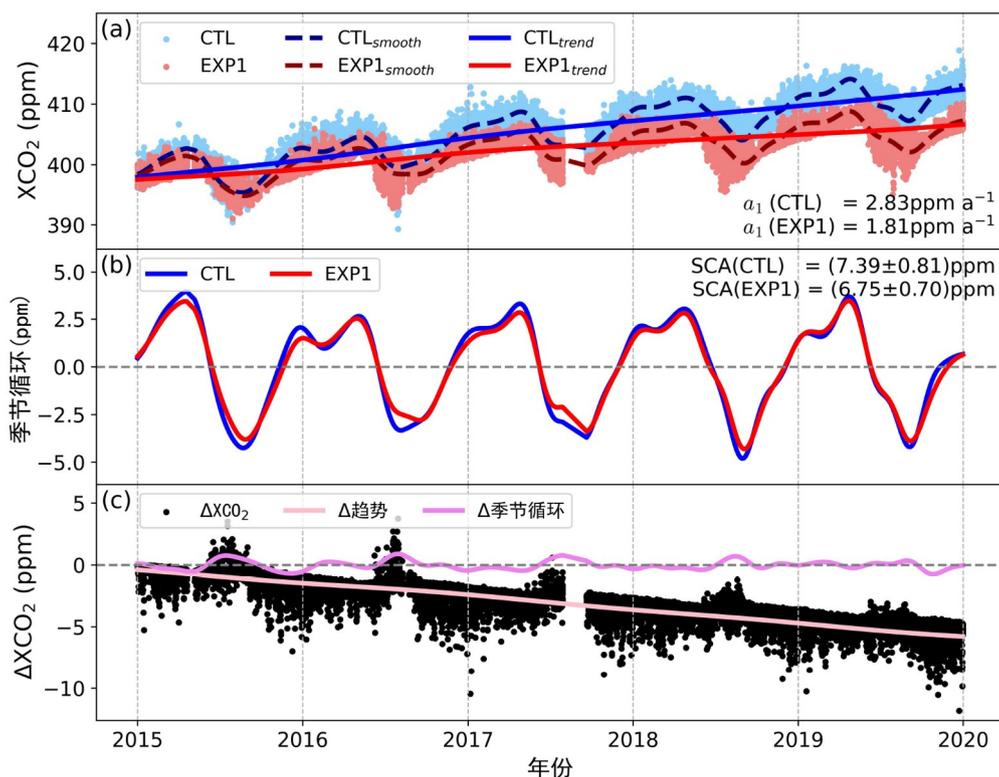


图4 理想净零CO₂排放条件下中国XCO₂的变化

(a) 对照实验(CTL, 蓝色点和线)和理想净零排放实验(EXP1, 红色点和线)的XCO₂模拟值(点)、XCO₂平滑拟合曲线(虚线)和XCO₂趋势线(实线); (b) CTL(蓝色线)和EXP1(红色线)情况下XCO₂的SCA; (c) EXP1和CTL之间XCO₂差异, 包括模拟值(黑色点)、趋势(粉色线)和季节循环(紫色线)

的线性趋势为 1.81 ppm a^{-1} ($p < 0.01$), 而CTL的线性趋势为 2.83 ppm a^{-1} ($p < 0.01$), 故净零CO₂排放情况下XCO₂的线性趋势减少了 1.02 ppm a^{-1} . 换言之, 中国XCO₂的约64%的增长趋势是由大气环流输送的境外CO₂排放引起的. 在净零CO₂排放情况下, 中国XCO₂的累积量在5年内减少了 5.39 ppm , 小于中国化石燃料CO₂累积排放量 6.15 ppm (约 47.85 Gt CO_2). 相比之下, XCO₂的SCA变化并不明显, 在EXP1中为 $(6.75 \pm 0.70) \text{ ppm}$, 而CTL中为 $(7.39 \pm 0.81) \text{ ppm}$, 这表明中国的碳源和碳汇对其XCO₂的SCA影响较弱. 总体而言, 中国实现净零CO₂排放的措施, 包括化石CO₂排放的减少和陆地CO₂汇作用的增加, 能够使XCO₂的线性增长趋势减少约35.89%, 并使中国区域的XCO₂空间变化减少约9.91% (表1).

从空间上看, 中国净零CO₂排放可对区域XCO₂趋势造成显著的下陷影响(图5a). 华北和华南地区的XCO₂趋势下降较明显, 而青藏高原的下降趋势最弱.

有趣的是, 这一空间分布与中国化石CO₂排放量和陆地CO₂汇的空间分布存在差异(图1和图5a), 这很可能与大气环流的影响有关, 如东亚季风(网络版附图S2). 例如, 冬季盛行的东北风会将华北地区的大量化石CO₂排放大规模输送至华中地区(网络版附图S2~S4). 这导致华中地区的本地化石CO₂排放虽然较弱, 但该地区的XCO₂减少趋势却最为明显. 逐年的XCO₂相对变化进一步证实了这一现象(网络版附图S4a~S4e).

同样的, XCO₂的SCA变化在空间分布上同样存在差异(图5b). 在净零排放条件下, 华北和东北地区的SCA下降更为显著, 而华南地区的SCA则变化较小. XCO₂的SCA的这些变化与陆地CO₂汇的季节周期密切相关. 在冬季, 华北和东北地区碳源较弱, 而夏季碳汇较强(网络版附图S5), 表明这些地区存在显著的季节性变化, 且与XCO₂ SCA变化较大的区域位置相吻合(图5b). 相比之下, 华南地区全年呈现碳固定作用, 导致XCO₂的SCA变化相对较弱. 此外, 在西部地区,

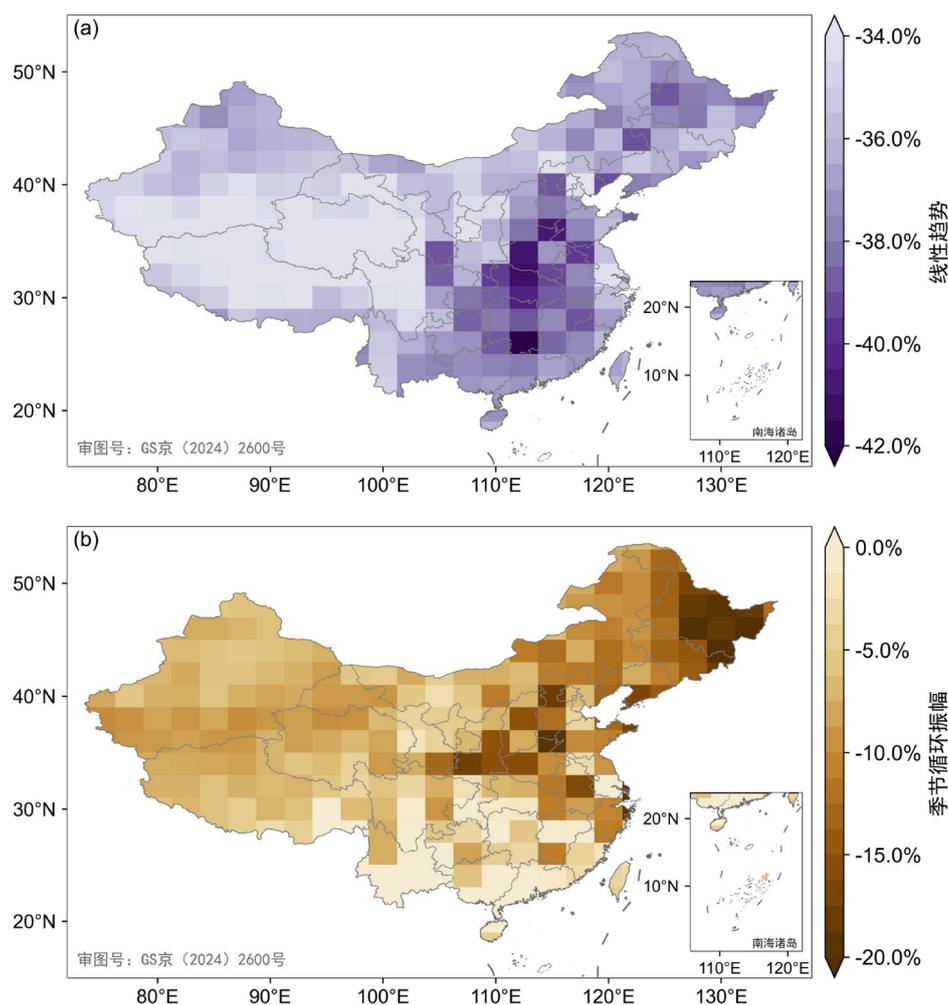


图5 EXP1和CTL条件下中国XCO₂线性趋势和季节循环振幅(SCA)的相对变化
(a) 中国XCO₂线性趋势的相对变化; (b) 中国XCO₂季节循环振幅的相对变化

虽然CO₂汇的季节性差异不显著,但由于大气环流的调制,XCO₂的SCA在净零排放条件下仍有所下降。

3.3 化石CO₂排放和陆地CO₂汇各自对XCO₂的贡献

进一步分析了中国化石CO₂排放和陆地CO₂汇在XCO₂变化中的单独影响。根据无人为化石CO₂排放实验(EXP2)的结果发现,XCO₂的线性趋势为1.67ppm a⁻¹ ($p < 0.01$),对应的SCA为(7.95±1.34)ppm(图6)。与CTL中的2.83ppm a⁻¹ ($p < 0.01$)和(7.39±0.81)ppm相比,XCO₂的线性趋势每年减少1.16ppm,而SCA则略微增加了0.59ppm。因此,若无化石CO₂排放,XCO₂的线性增长趋势可减少约40.81%,而SCA则略有增加,约为7.57%

(表2)。这些发现突出表明,在理想净零CO₂排放情况下,化石CO₂排放量的变化在推动XCO₂上升趋势减少方面起着主导作用。

图6d和6e分别展示了在EXP2实验中,与CTL相比,中国XCO₂趋势和SCA变化的空间分布。在无人为化石CO₂排放的情况下,XCO₂线性趋势的降幅明显更大,某些地区的减少幅度甚至超过了46%,并呈现出与净零CO₂排放条件下相似的空间模式(图6d和5a)。相反,SCA普遍增强,尤其是在西南地区(图6b)。与全年XCO₂显著下降的华东地区相比,华南地区春季XCO₂下降幅度较小,而在其他季节下降幅度较大(网络版附图S6),使得零化石CO₂排放对西南地区XCO₂的SCA影响更为显著。

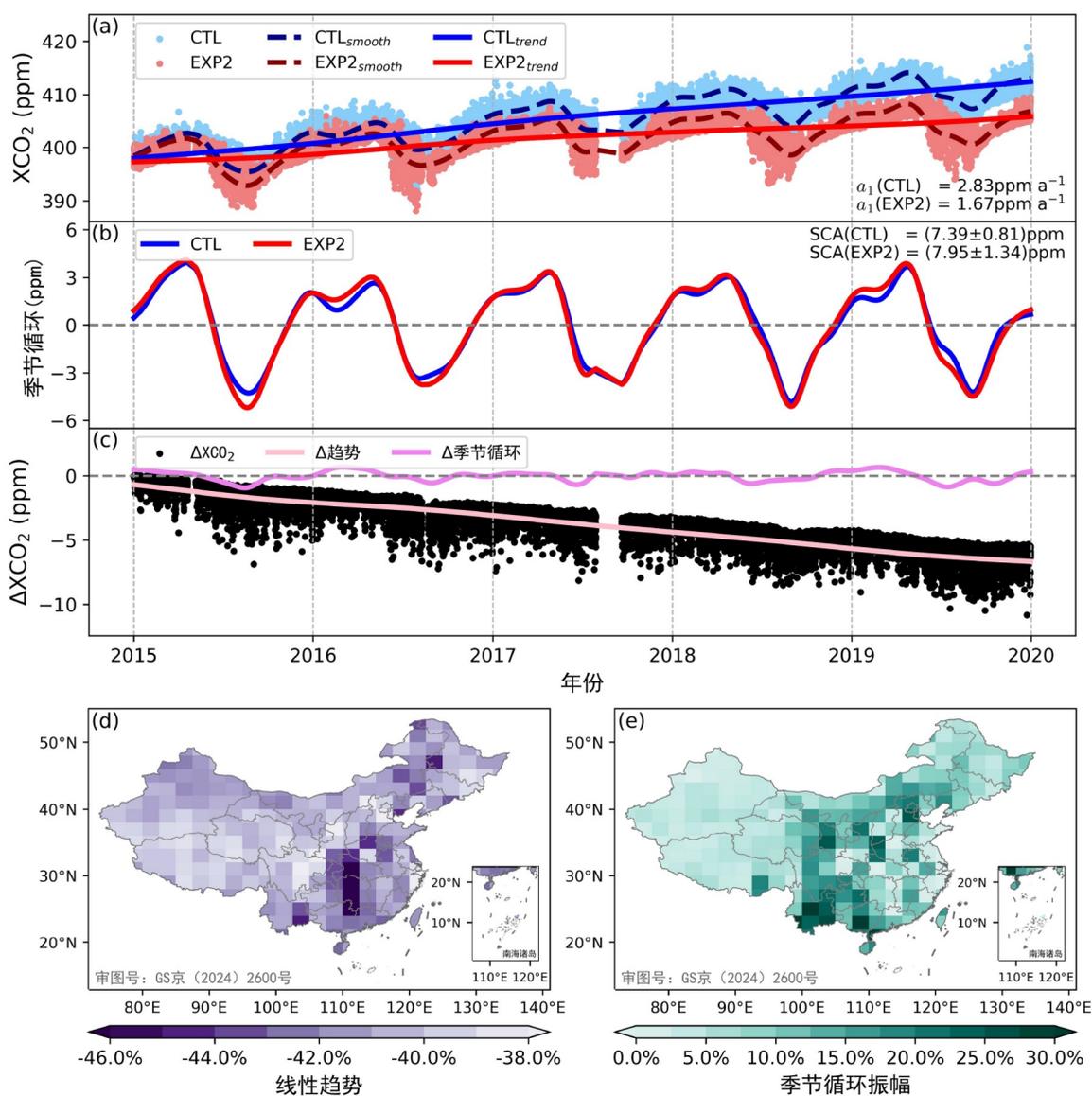


图6 无人为化石CO₂排放下(EXP2)中国XCO₂变化

(a) CTL(蓝色点和线)和EXP2(红色点和线)条件下中国XCO₂的模拟值、平滑拟合曲线和趋势线; (b) CTL(蓝色线)和EXP2(红色线)条件下的XCO₂的季节循环; (c) CTL和EXP2之间XCO₂的差异; (d) EXP2和CTL之间XCO₂的线性趋势的相对变化; (e) XCO₂的SCA的相对变化

图7显示了中国无陆地CO₂汇的影响(EXP3). 没有陆地CO₂汇的情况下, 中国的XCO₂线性趋势为 2.97 ppm a^{-1} ($p < 0.01$), 较CTL略有上升 0.14 ppm a^{-1} . 因此, 中国的陆地CO₂汇在一定程度上缓解了XCO₂增长趋势, 约为4.92%, 但这一效应远小于化石CO₂排放的影响. 相反, 陆地CO₂汇有助于增强SCA, 增幅为 1.23 ppm , 约为16.61%(几乎是化石CO₂排放效应的2倍).

在空间分布上, 陆地CO₂汇的缺失导致中国各地XCO₂的线性趋势增加, 尤其是西部地区(图7d). 从单个年份上看XCO₂年增加的空间模式(网络版附图S4k~S4o)与中国碳汇的总体分布基本一致(图1b). 然而, 中国东部地区的陆地CO₂汇在夏季达到峰值(图1b), 此时的东亚夏季季风盛行西南风和东南风(网络版附图S2b)会将大气中的CO₂输送到向内陆. 因此, 在多年累积效应的影响下, 中国西部地区的XCO₂下降趋

表 2 相较于对照试验, 不同敏感性试验中的中国CO₂浓度线性趋势(a_1)和季节循环振幅(SCA)的相对变化

CO ₂ 浓度	位置	变量	EXPI	EXP2	EXP3
XCO ₂	中国	a_1	-35.89%	-40.81%	4.92%
		SCA	-9.91%	7.57%	-16.61%
地面CO ₂	WLG	a_1	-41.88%	-47.85%	6.11%
		SCA	-20.36%	24.10%	-32.88%
	LFS	a_1	-54.37%	-37.60%	-16.66%
		SCA	-58.82%	-6.49%	-49.31%
	LAN	a_1	-44.64%	-46.63%	1.89%
		SCA	-57.93%	-32.32%	-28.08%
	XGL	a_1	-34.59%	-49.41%	15.04%
		SCA	-35.21%	12.30%	-45.92%

势更强(图7d和网络版附图S7i~S7l)。此外, 缺少陆地CO₂汇的SCA空间分布模式类似于理想净零排放下的空间分布(图5b)。

3.4 理想净零排放下地面CO₂浓度变化

图8显示了WLG、LFS、LAN和XGL四个站点在理想净零排放条件下模拟的地面CO₂浓度, 网络版附图S8给出了JSA和SDZ站点的模拟结果。与WLG站在正常排放情况下的模拟结果相比, 净零排放导致地面CO₂浓度的线性趋势从2.96ppm a⁻¹下降到1.72ppm a⁻¹, SCA从(10.06±2.67)ppm下降到(8.01±0.31)ppm。因此, 2015~2019年, 大气本底观测站WLG站的地面CO₂浓度减少了6.6ppm, 与中国XCO₂的累计减少量5.39ppm相似(图4a)。相较于正常排放, 中国的净零CO₂排放使得WLG站的CO₂浓度增加值下降了约41.88%, 其中化石CO₂排放和陆地CO₂汇分别占-47.85%和6.11%(表2)。此外, 净零CO₂排放使SCA显著降低了20.36%, 这一影响比XCO₂中观察到的更为显著。单独来看, 无化石CO₂排放导致SCA增加24.10%, 而无陆地CO₂汇则导致SCA显著减少32.88%。

在LFS站和XGL站, 地面CO₂浓度的趋势和季节循环振幅的变化与WLG站相似(图8b和8d)。在净零CO₂排放条件下, CO₂浓度增长的减少由化石CO₂排放主导, 分别减少了-37.60%和-49.41%。同时, SCA的减少均由陆地CO₂汇驱动, 分别减少了-49.31%和-45.92%。

最后, 位于化石CO₂排放量较高的长江三角洲地区的LAN站的模拟结果与其他站点有所不同。净零

CO₂排放导致地面CO₂浓度累计降低15ppm, 下降幅度远高于其他三个站点。与CTL条件下地面CO₂的2.76ppm a⁻¹线性趋势相比, 净零排放使地面CO₂的线性趋势降低到1.53ppm a⁻¹, 下降了44.64%。此外, 季节循环也有显著变化, 净零排放下的SCA为(9.49±0.70)ppm, 比CTL中的(22.55±8.82)ppm降低了57.93%。然而, 其SCA的减少主要来自化石CO₂排放, 降低了-32.32%, 而非陆地CO₂汇(-28.08%)。

总之, 在净零CO₂排放条件下, 各站点地面CO₂浓度的变化趋势与中国的XCO₂的变化趋势基本相同(表2)。然而, 各站点的地面CO₂浓度SCA下降幅度远大于XCO₂的下降幅度, 这表明在较短的时间尺度上, 地面CO₂浓度的变化更容易受到地表碳源和碳汇变化的影响。

4 讨论与结论

本研究基于GEOS-Chem模型, 通过2015年至2019年的敏感性模拟试验, 研究了理想净零CO₂排放对中国XCO₂和地面CO₂浓度的影响。GEOS-Chem模型在重现大气CO₂浓度方面具有较高的准确性, 模拟的XCO₂与OCO-2观测值的均方根误差(RMSE)为1.51ppm($R^2=0.89$), 而表层CO₂浓度与WLG站点观测值的RMSE为2.65ppm($R^2=0.75$)。与CTL结果相比, 净零排放条件下XCO₂的增长趋势从2.83ppm a⁻¹降至1.81ppm a⁻¹, 减少了1.02ppm a⁻¹, 这使得XCO₂在五年内累计减少了5.39ppm。中国净零CO₂排放使XCO₂的增长趋势降低了35.89%, 主要由化石CO₂排放量的减

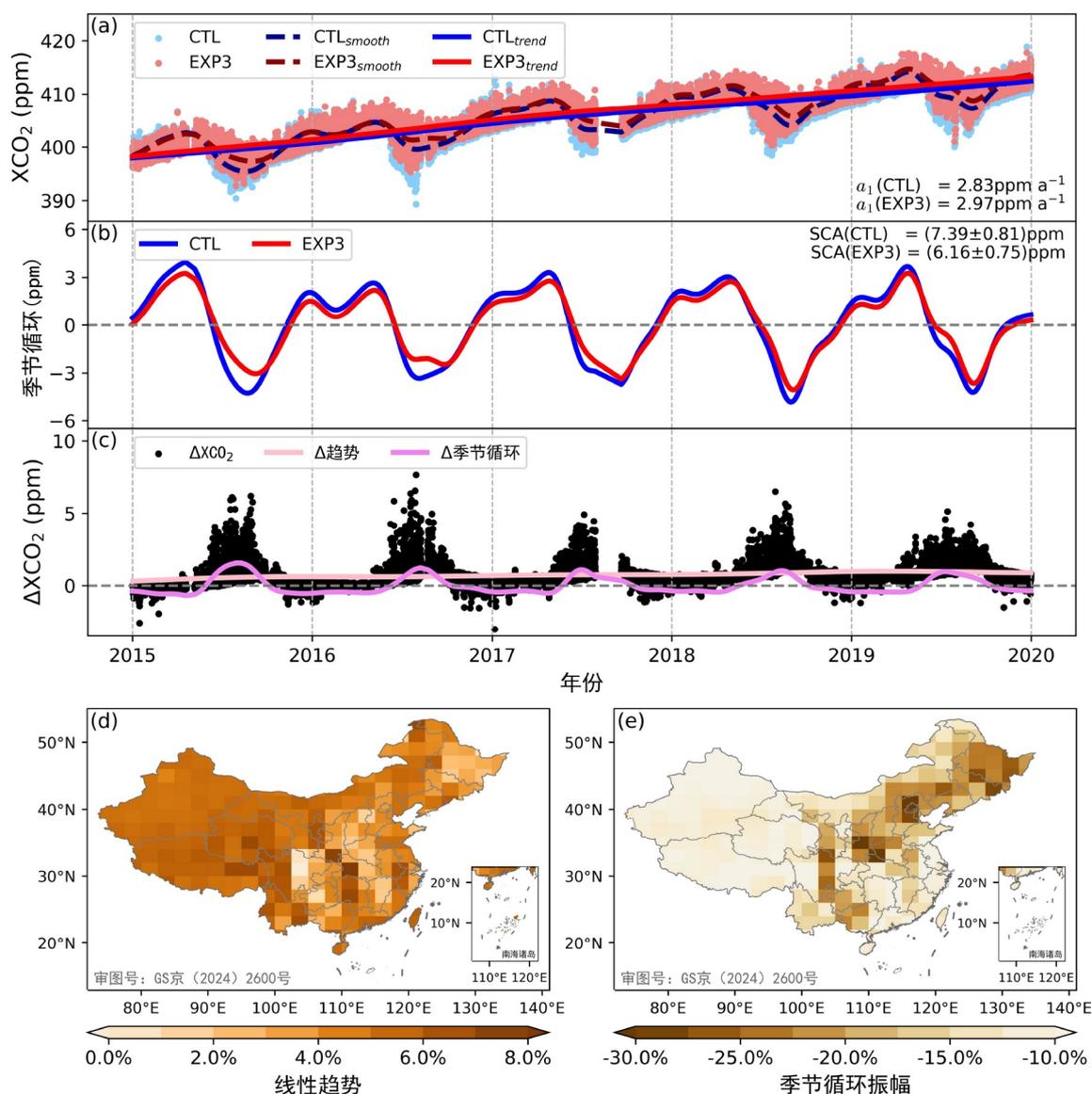


图7 无陆地CO₂汇情况下(EXP3)中国XCO₂变化

(a) CTL(蓝色点和线)和EXP3(红色点和线)条件下中国XCO₂的模拟值、平滑拟合曲线和趋势线; (b) CTL(蓝色线)和EXP3(红色线)条件下的XCO₂的季节循环; (c) CTL和EXP3之间XCO₂的差异; (d) EXP3和CTL之间XCO₂的线性趋势的相对变化; (e) XCO₂的SCA的相对变化

少(-40.81%)驱动. 此外, XCO₂的SCA变化不明显, 从CTL的(7.39±0.70)ppm下降到净零排放条件下的(6.75±0.70)ppm, 减少幅度为9.91%. 在空间分布上, 华北和华南地区的XCO₂趋势下降更明显, 而华北和东北地区的SCA减幅更大.

进一步发现, 地面CO₂浓度更容易受到CO₂源汇变化的影响. 在中国净零CO₂排放情况下, 地面浓度的增长显著放缓, LFS站甚至下降了54.37%. 与其他三个站

点(WLG、LFS和XGL)相比, 位于化石CO₂高排放区的LAN站地面CO₂浓度下降幅度最大, 下降了约15ppm. 同时, 地面CO₂浓度的SCA因净零CO₂排放而显著降低, 是XCO₂下降幅度的2倍多.

值得注意的是, 模型模拟中存在一定不确定性, 主要来源包括地表通量输入数据、重启文件和大气传输模式误差(Fu等, 2019; Schuh等, 2019; Liu等, 2024). 为降低这些不确定性, 我们采取了多项措施. 例如, 使

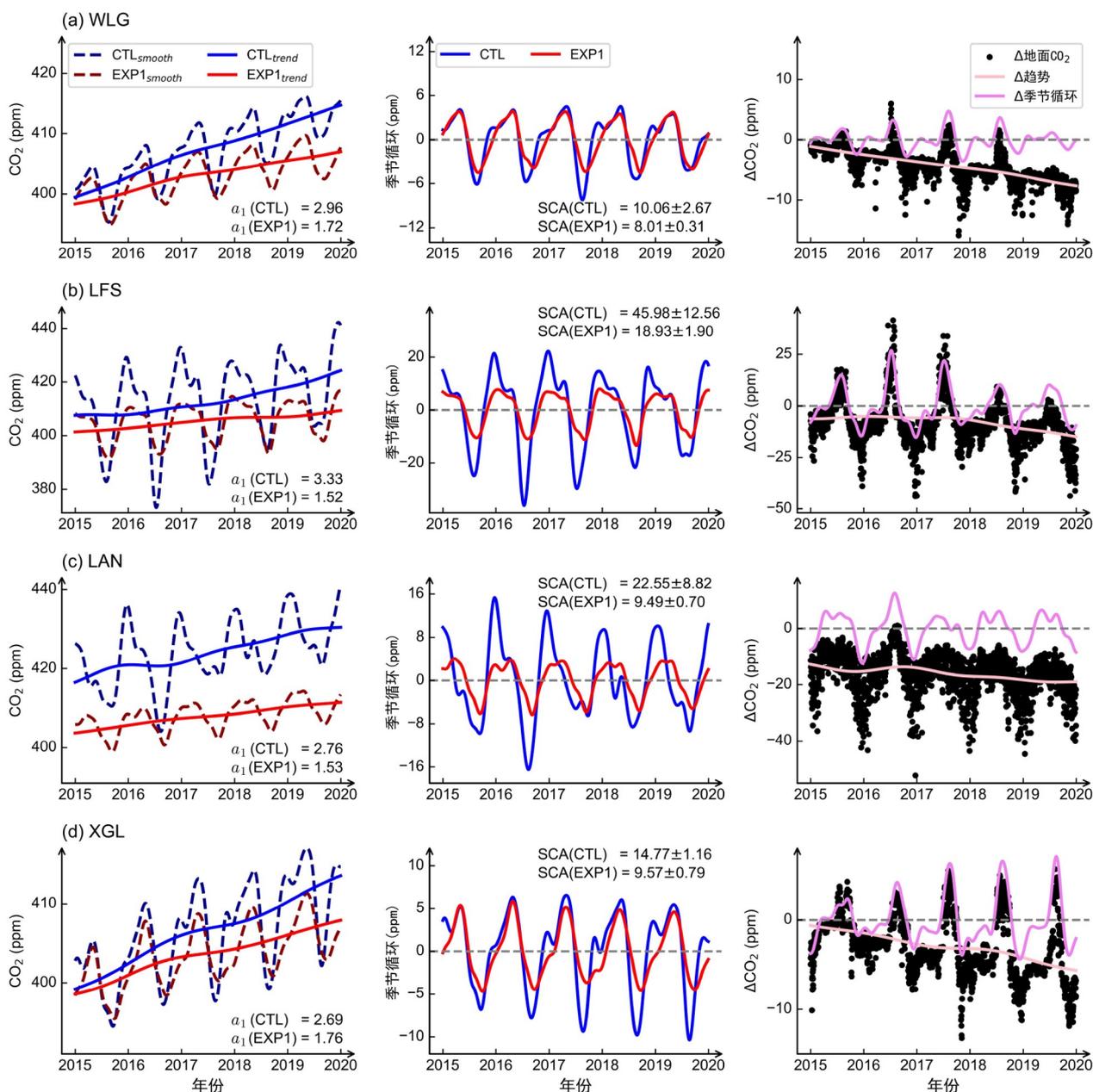


图 8 在理想净零CO₂排放下, WLG(a)、LFS(b)、LAN(c)和XGL(d)四个站点地面CO₂浓度线性趋势和SCA变化

左栏显示的是CTL(蓝色线)和EXP1(红色线)条件下地面CO₂浓度的平滑拟合曲线(虚线)和趋势线(实线)。中间栏显示的是地面CO₂浓度的季节循环。右栏显示的是两种条件下地面CO₂浓度变量之间的差异,包括模拟值(点)、趋势(粉色线)和季节循环(紫色线)。线性趋势 α_1 的单位是ppm a⁻¹和SCA的单位为ppm

用了OCO-2 v10 MIP中规定的ODIAC人为碳排放清单数据(Oda等, 2018; Byrne等, 2023)和GCASv2的优化结果(Wang等, 2019; Jiang等, 2021)。所需的重启文件是在同化研究的基础上通过一年的重启动生成。此外,选择GEOS-Chem模型这一公认的全球大气化学模型,因

其在模拟CO₂浓度方面具有较高的准确性(Zhang等, 2017; Mustafa等, 2021; Allahudheen等, 2023; Su等, 2023)。

总体而言,本研究的理想模拟结果表明,中国实现净零CO₂排放的承诺是减缓大气CO₂浓度增加、应对

气候变化的重要一步。中国的碳中和目标将在减缓全球变暖进程中发挥至关重要的作用。然而, 需认识到, 尽管中国努力实现净零CO₂排放可以缓解相当一部分(约35.89%)XCO₂上升趋势, 但仅此还不足以有效应对气候变化。此外, 其他国家的碳排放会通过大气传输进而影响中国的CO₂浓度。例如, 受西风带影响的WLG站对欧亚大陆地面排放表现出较高的敏感性(Cheng等, 2017)。因此, 为了更好地应对全球变暖的挑战, 应对全球变暖的挑战并努力将全球气温升高控制在1.5°C以内, 全球各国需共同协作(Rogelj等, 2016; Roelfsema等, 2020)。

另外, 尽管各国在碳中和方面取得了显著进展, 但需注意的是, 不同国家提出的碳中和目标并不能自动导致大气CO₂浓度的下降。想要降低大气中的CO₂含量, 有必要实现CO₂的净负排, 这需要依靠碳捕集、利用和封存(Carbon Capture, Utilization, and Storage, CCUS)等措施的实施(Chen等, 2022; Shang和Lv, 2023)。

此外, 值得一提的是, 实现净零CO₂排放的主要途径包括减少化石CO₂排放和增加自然CO₂汇。通过本研究中的理想模拟试验(图4、6和7), 预计在这些实施路径下, CO₂浓度的上升趋势将有所缓减, 而SCA也将发生变化。近年来, 理解大气CO₂浓度的SCA变化也是重要研究热点中(Zeng等, 2014; Wang等, 2021)的一个焦点。

致谢 数据可用性: OCO-2的XCO₂数据集可在https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/OCO2_L2_Lite_FP_10r/summary获取。ObsPack的地表CO₂数据集可在<https://gml.noaa.gov/ccgg/obspace/data.php>获取。GCAS可在<http://www.gcas.net.cn/gcasPages/dataDownload/dataDownload.htmlh>获取。

参考文献

- 张雅欣, 罗荟霖, 王灿. 2021. 碳中和行动的国际趋势分析. 气候变化研究进展, 17: 88–97
- AghaKouchak A, Chiang F, Huning L S, Love C A, Mallakpour I, Mazdiyasn O, Mofakhari H, Papalexioiu S M, Ragno E, Sadeh M. 2020. Climate extremes and compound hazards in a warming world. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 48: 519–548
- Allahudheen S, Chandra A B, Nayak R K, Dadhwal V K, Krishnapriya M, Lakshmaiah M V. 2023. High-resolution GEOS-Chem model for Indian monsoon region: Seasonal cycle and budget of tropospheric CO₂. *Atmos Environ*, 309: 119913
- Bukosa B, Fisher J A, Deutscher N M, Jones D B A. 2023. A coupled CH₄, CO and CO₂ simulation for improved chemical source modeling. *Atmosphere*, 14: 764
- Byrne B, Baker D F, Basu S, Bertolacci M, Bowman K W, Carroll D, Chatterjee A, Chevallier F, Ciais P, Cressie N, Crisp D, Crowell S, Deng F, Deng Z, Deutscher N M, Dubey M K, Feng S, Garcia O E, Griffith D W T, Herkommer B, Hu L, Jacobson A R, Janardanan R, Jeong S, Johnson M S, Jones D B A, Kivi R, Liu J J, Liu Z Q, Maksyutov S, Miller J B, Miller S M, Morino I, Notholt J, Oda T, O'Dell C W, Oh Y S, Ohyama H, Patra P K, Peiro H, Petri C, Philip S, Pollard D F, Poulter B, Remaud M, Schuh A, Sha M K, Shiomi K, Strong K, Sweeney C, Té Y, Tian H Q, Velasco V A, Vrekoussis M, Warneke T, Worden J R, Wunch D, Yao Y Z, Yun J, Zammit-Mangion A, Zeng N. 2023. National CO₂ budgets (2015–2020) inferred from atmospheric CO₂ observations in support of the global stocktake. *Earth Syst Sci Data*, 15: 963–1004
- Chatterjee A, Gierach M M, Sutton A J, Feely R A, Crisp D, Eldering A, Gunson M R, O'Dell C W, Stephens B B, Schimel D S. 2017. Influence of El Niño on atmospheric CO₂ over the tropical Pacific Ocean: Findings from NASA's OCO-2 mission. *Science*, 358: eaam5776
- Chen S, Liu J, Zhang Q, Teng F, McLellan B C. 2022. A critical review on deployment planning and risk analysis of carbon capture, utilization, and storage (CCUS) toward carbon neutrality. *Renew Sust Energy Rev*, 167: 112537
- Cheng S Y, An X Q, Zhou L X, Tans P P, Jacobson A. 2017. Atmospheric CO₂ at Waliguan station in China: Transport climatology, temporal patterns and source-sink region representativeness. *Atmos Environ*, 159: 107–116
- Connor B J, Boesch H, Toon G, Sen B, Miller C, Crisp D. 2008. Orbiting Carbon Observatory: Inverse method and prospective error analysis. *J Geophys Res*, 113: 2006JD008336
- Dong H M, Liu Y S, Zhao Z H, Tan X J, Managi S. 2022. Carbon neutrality commitment for China: From vision to action. *Sust Sci*, 17: 1741–1755
- Eldering A, Wennberg P O, Crisp D, Schimel D S, Gunson M R, Chatterjee A, Liu J, Schwandner F M, Sun Y, O'Dell C W, Frankenberg C, Taylor T, Fisher B, Osterman G B, Wunch D, Hakkarainen J, Tamminen J, Weir B. 2017. The Orbiting Carbon Observatory-2 early science investigations of regional carbon dioxide fluxes. *Science*, 358: eaam5745
- Feldman A F, Zhang Z, Yoshida Y, Chatterjee A, Poulter B. 2023. Using Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) column CO₂ retrievals to rapidly detect and estimate biospheric surface carbon

- flux anomalies. *Atmos Chem Phys*, 23: 1545–1563
- Fu Y, Liao H, Tian X J, Gao H, Cai Z N, Han R. 2019. Sensitivity of the simulated CO₂ concentration to inter-annual variations of its sources and sinks over East Asia. *Adv Clim Change Res*, 10: 250–263
- Fuglestedt J, Rogelj J, Millar R J, Allen M, Boucher O, Cain M, Forster P M, Kriegler E, Shindell D. 2018. Implications of possible interpretations of ‘greenhouse gas balance’ in the Paris Agreement. *Phil Trans R Soc A*, 376: 20160445
- Gampe D, Zscheischler J, Reichstein M, O’Sullivan M, Smith W K, Sitch S, Buermann W. 2021. Increasing impact of warm droughts on northern ecosystem productivity over recent decades. *Nat Clim Chang*, 11: 772–779
- He Y G, Li X, Huang P P, Wang J N. 2022. Exploring the road toward environmental sustainability: Natural resources, renewable energy consumption, economic growth, and greenhouse gas emissions. *Sustainability*, 14: 1579
- Hoesly R M, Smith S J, Feng L Y, Klimont Z, Janssens-Maenhout G, Pitkanen T, Seibert J J, Vu L, Andres R J, Bolt R M, Bond T C, Dawidowski L, Kholod N, Kurokawa J-I, Li M, Liu L, Lu Z F, Moura M C P, O’Rourke P R, Zhang Q. 2018. Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS). *Geosci Model Dev*, 11: 369–408
- Höök M, Tang X. 2013. Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review. *Energy Policy*, 52: 797–809
- IPCC. 2021. Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. 425–427
- Jeffry L, Ong M Y, Nomanbhay S, Mofijur M, Mubashir M, Show P L. 2021. Greenhouse gases utilization: A review. *Fuel*, 301: 121017
- Jiang F, Wang H M, Chen J M, Ju W M, Tian X J, Feng S Z, Li G C, Chen Z Q, Zhang S P, Lu X H, Liu J, Wang H K, Wang J, He W, Wu M S. 2021. Regional CO₂ fluxes from 2010 to 2015 inferred from GOSAT XCO₂ retrievals using a new version of the Global Carbon Assimilation System. *Atmos Chem Phys*, 21: 1963–1985
- Jin C L, Xue Y, Jiang X X, Zhao L, Yuan T, Sun Y X, Wu S H, Wang X K. 2022. A long-term global XCO₂ dataset: Ensemble of satellite products. *Atmos Res*, 279: 106385
- Keenan T F, Prentice I C, Canadell J G, Williams C A, Wang H, Raupach M, Collatz G J. 2016. Recent pause in the growth rate of atmospheric CO₂ due to enhanced terrestrial carbon uptake. *Nat Commun*, 7: 13428
- Keller C A, Long M S, Yantosca R M, Da Silva A M, Pawson S, Jacob D J. 2014. HEMCO v1.0: A versatile, ESMF-compliant component for calculating emissions in atmospheric models. *Geosci Model Dev*, 7: 1409–1417
- Schuldt K N, Mund J, Luijkx I T, Aalto T, Abshire J B, Aikin K, et al. 2022. Multi-laboratory compilation of atmospheric carbon dioxide data for the period 1957–2021; obspack_co2_1_GLOBALVIEW-plus_v8.0_2022-08-27
- Kiel M, O’Dell C W, Fisher B, Eldering A, Nassar R, MacDonald C G, Wennberg P O. 2019. How bias correction goes wrong: Measurement of XCO₂ affected by erroneous surface pressure estimates. *Atmos Meas Tech*, 12: 2241–2259
- Laufkötter C, Zscheischler J, Frölicher T L. 2020. High-impact marine heatwaves attributable to human-induced global warming. *Science*, 369: 1621–1625
- Li B P, Gasser T, Ciaia P, Piao S, Tao S, Balkanski Y, Hauglustaine D, Boisier J P, Chen Z, Huang M T, Li L Z X, Li Y, Liu H Y, Liu J F, Peng S S, Shen Z H, Sun Z Z, Wang R, Wang T, Yin G D, Yin Y, Zeng H, Zeng Z Z, Zhou F. 2016. The contribution of China’s emissions to global climate forcing. *Nature*, 531: 357–361
- Li J, Jia K, Wei X Q, Xia M, Chen Z L, Yao Y J, Zhang X T, Jiang H Y, Yuan B, Tao G F, Zhao L L. 2022. High-spatiotemporal resolution mapping of spatiotemporally continuous atmospheric CO₂ concentrations over the global continent. *Int J Appl Earth Observat Geoinf*, 108: 102743
- Lin H, Jacob D J, Lundgren E W, Sulprizio M P, Keller C A, Fritz T M, Eastham S D, Emmons L K, Campbell P C, Baker B, Saylor R D, Montuoro R. 2021. Harmonized Emissions Component (HEMCO) 3.0 as a versatile emissions component for atmospheric models: Application in the GEOS-Chem, NASA GEOS, WRF-GC, CESM2, NOAA GEFS-Aerosol, and NOAA UFS models. *Geosci Model Dev*, 14: 5487–5506
- Liu Z, Zeng N, Liu Y, Wang J, Han P F, Cai Q X. 2024. Weaker regional carbon uptake albeit with stronger seasonal amplitude in northern mid-latitudes estimated by higher resolution GEOS-Chem model. *Sci Total Environ*, 912: 169477
- Lou H Z, Shi X W, Ren X Y, Yang S T, Cai M Y, Pan Z H, Zhu Y F, Feng D Y, Zhou B C. 2024. Limited terrestrial carbon sinks and increasing carbon emissions from the Hu Line spatial pattern perspective in China. *Ecol Indicators*, 162: 112035
- Masarie K A, Peters W, Jacobson A R, Tans P P. 2014. ObsPack: A framework for the preparation, delivery, and attribution of atmospheric greenhouse gas measurements. *Earth Syst Sci Data*, 6: 375–384
- Messerschmidt J, Parazoo N, Wunch D, Deutscher N M, Roehl C, Warneke T, Wennberg P O. 2013. Evaluation of seasonal atmosphere-biosphere exchange estimations with TCCON measurements. *Atmos Chem Phys*, 13: 5103–5115
- Mustafa F, Wang H J, Bu L B, Wang Q, Shahzaman M, Bilal M, Zhou

- M Q, Iqbal R, Aslam R W, Ali M A, Qiu Z F. 2021. Validation of GOSAT and OCO-2 against *in situ* aircraft measurements and comparison with CarbonTracker and GEOS-Chem over Qinhuangdao, China. *Remote Sens*, 13: 899
- Oda T, Maksyutov S. 2011. A very high-resolution (1 km×1 km) global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights. *Atmos Chem Phys*, 11: 543–556
- Oda T, Maksyutov S, Andres R J. 2018. The Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂, version 2016 (ODIAC2016): A global monthly fossil fuel CO₂ gridded emissions data product for tracer transport simulations and surface flux inversions. *Earth Syst Sci Data*, 10: 87–107
- Olsen S C, Wuebbles D J, Owen B. 2013. Comparison of global 3-D aviation emissions datasets. *Atmos Chem Phys*, 13: 429–441
- Ponce P, Khan S A R. 2021. A causal link between renewable energy, energy efficiency, property rights, and CO₂ emissions in developed countries: A road map for environmental sustainability. *Environ Sci Pollut Res*, 28: 37804–37817
- Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T, Flannery B P. 1988. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. Cambridge: Cambridge University Press
- Randerson J T, van der Werf G R, Giglio L, Collatz G J, Kasibhatla P S. 2018. Global Fire Emissions Database, Version 4.1 (GFEDv4). Oak Ridge: ORNL DAAC
- Roelfsema M, van Soest H L, Harmsen M, van Vuuren D P, Bertram C, den Elzen M, Höhne N, Iacobuta G, Krey V, Kriegler E, Luderer G, Riahi K, Ueckerdt F, Després J, Drouet L, Emmerling J, Frank S, Fricko O, Gidden M, Humpenöder F, Huppmann D, Fujimori S, Fragkiadakis K, Gi K, Keramidas K, Köberle A C, Aleluia Reis L, Rochedo P, Schaeffer R, Oshiro K, Vrontisi Z, Chen W Y, Iyer G C, Edmonds J, Kannavou M, Jiang K J, Mathur R, Safonov G, Vishwanathan S S. 2020. Taking stock of national climate policies to evaluate implementation of the Paris Agreement. *Nat Commun*, 11: 2096
- Rogelj J, den Elzen M, Höhne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, Schaeffer R, Sha F, Riahi K, Meinshausen M. 2016. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C. *Nature*, 534: 631–639
- Rogelj J, Huppmann D, Krey V, Riahi K, Clarke L, Gidden M, Nicholls Z, Meinshausen M. 2019. A new scenario logic for the Paris Agreement long-term temperature goal. *Nature*, 573: 357–363
- Salvia M, Reckien D, Pietrapertosa F, Eckersley P, Spyridaki N A, Krook-Riekkola A, Olazabal M, De Gregorio Hurtado S, Simoes S G, Geneletti D, Vigiú V, Fokaidis P A, Ioannou B I, Flamos A, Csete M S, Buzasi A, Orru H, de Boer C, Foley A, Rižnar K, Matosović M, Balzan M V, Smigaj M, Baštáková V, Streberova E, Šel N B, Coste L, Tardieu L, Altenburg C, Lorencová E K, Orru K, Wejs A, Feliu E, Church J M, Grafakos S, Vasilie S, Paspaldzhiev I, Heidrich O. 2021. Will climate mitigation ambitions lead to carbon neutrality? An analysis of the local-level plans of 327 cities in the EU. *Renew Sust Energy Rev*, 135: 110253
- Schuh A E, Jacobson A R, Basu S, Weir B, Baker D, Bowman K, Chevallier F, Crowell S, Davis K J, Deng F, Denning S, Feng L, Jones D, Liu J, Palmer P I. 2019. Quantifying the impact of atmospheric transport uncertainty on CO₂ surface flux estimates. *Glob Biogeochem Cycle*, 33: 484–500
- Shang W L, Lv Z H. 2023. Low carbon technology for carbon neutrality in sustainable cities: A survey. *Sustain Cities Soc*, 92: 104489
- Su M Q, Shi Y S, Yang Y L, Guo W Y. 2023. Impacts of different biomass burning emission inventories: Simulations of atmospheric CO₂ concentrations based on GEOS-Chem. *Sci Total Environ*, 876: 162825
- Thoning K W, Tans P P, Komhyr W D. 1989. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory: 2. Analysis of the NOAA GMCC data, 1974–1985. *J Geophys Res*, 94: 8549–8565
- van Soest H L, den Elzen M G J, van Vuuren D P. 2021. Net-zero emission targets for major emitting countries consistent with the Paris Agreement. *Nat Commun*, 12: 2140
- Vicedo-Cabrera A M, Scovronick N, Sera F, Royé D, Schneider R, Tobias A, Astrom C, Guo Y, Honda Y, Hondula D M, Abrutzky R, Tong S, de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho M, Saldiva P H N, Lavigne E, Correa P M, Ortega N V, Kan H, Osorio S, Kysely J, Urban A, Orru H, Indermitte E, Jaakkola J J K, Rytty N, Pascal M, Schneider A, Katsouyanni K, Samoli E, Mayvaneh F, Entezari A, Goodman P, Zeka A, Michelozzi P, de'Donato F, Hashizume M, Alahmad B, Diaz M H, Valencia C D L C, Overcenco A, Houthuijs D, Ameling C, Rao S, Di Ruscio F, Carrasco-Escobar G, Seposo X, Silva S, Madureira J, Holobaca I H, Fratianni S, Acquotta F, Kim H, Lee W, Iniguez C, Forsberg B, Ragettli M S, Guo Y L L, Chen B Y, Li S, Armstrong B, Aleman A, Zanobetti A, Schwartz J, Dang T N, Dung D V, Gillett N, Haines A, Mengel M, Huber V, Gasparrini A. 2021. The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nat Clim Chang*, 11: 492–500
- Wang H M, Jiang F, Wang J, Ju W M, Chen J M. 2019. Terrestrial ecosystem carbon flux estimated using GOSAT and OCO-2 XCO₂ retrievals. *Atmos Chem Phys*, 19: 12067–12082
- Wang J, Liu Z Q, Zeng N, Jiang F, Wang H M, Ju W M. 2020. Spaceborne detection of XCO₂ enhancement induced by Australian mega-bushfires. *Environ Res Lett*, 15: 124069
- Wang K, Wang X H, Piao S L, Chevallier F, Mao J F, Shi X Y, Huntingford C, Bastos A, Ciais P, Xu H, Keeling R F, Pacala S W,

- Chen A P. 2021. Unusual characteristics of the carbon cycle during the 2015–2016 El Niño. *Glob Change Biol*, 27: 3798–3809
- Williams J H, Jones R A, Haley B, Kwok G, Hargreaves J, Farbes J, Torn M S. 2021. Carbon-neutral pathways for the United States. *AGU Adv*, 2: e2020AV000284
- WMO. 2023. WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 19. World Meteorological Organization
- Zeng N, Zhao F, Collatz G J, Kalnay E, Salawitch R J, West T O, Guanter L. 2014. Agricultural Green Revolution as a driver of increasing atmospheric CO₂ seasonal amplitude. *Nature*, 515: 394–397
- Zhang L L, Yue T X, Wilson J P, Zhao N, Zhao Y P, Du Z P, Liu Y. 2017. A comparison of satellite observations with the XCO₂ surface obtained by fusing TCCON measurements and GEOS-Chem model outputs. *Sci Total Environ*, 601-602: 1575–1590
- Zhang W X, Zhou T J. 2020. Increasing impacts from extreme precipitation on population over China with global warming. *Sci Bull*, 65: 243–252

(责任编辑: 张人禾)