杨钟昊,肖 薇,朱梦晶,等.杭州市高温热浪时期大气 CO_2 浓度变化特征及解析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):3634-3643.
Yang Z H, Xiao W, Zhu M J, et al. The variation characteristics and analysis of atmospheric CO_2 concentration during heatwave in Hangzhou [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):3634-3643.

杭州市高温热浪时期大气 CO_2 浓度变化特征及解析

杨钟昊[1],肖 薇[1*],朱梦晶[2],胡 诚[3],胡 凝[4],杨 樱[1],黄文晶[1],单 萌[2],李旭辉[5] (1.南京信息工程大学,中国气象局生态系统碳源汇重点开放实验室,大气环境中心,江苏 南京 210044;2.浙江临安大气成分本底国家野外科学观测研究站,浙江 杭州 311300;3.南京林业大学生态与环境学院,江苏 南京 210018;4.南京信息工程大学,气象灾害预报预警与评估省部共建协同创新中心,江苏 南京 210044;5.美国耶鲁大学环境学院,康涅狄格州 纽黑文 06511)

摘要：为明晰高温热浪时期城市大气 CO_2 浓度的变化特征及原因,基于 WRF-STILT 大气传输模型、EDGAR 人为源排放清单和高精度激光光谱分析仪的观测数据结合贝叶斯优化反演算法对长三角典型城市——杭州大气 CO_2 进行研究.结果表明,高温热浪对大气 CO_2 浓度产生显著影响:高温热浪期间的日间大气 CO_2 浓度低于非高温热浪时期,而夜间的 CO_2 浓度高于非高温热浪时期;观测站点的空间代表性和 CO_2 排放变化是影响杭州市大气 CO_2 浓度的主要原因;高温热浪使得大气 CO_2 浓度观测站点空间代表性产生显著差异:高温热浪使得局地排放占 80.5%,而非高温热浪时期仅占 51.6%,高温热浪时期空间代表范围较小;高温热浪时期不同人为源部门的 CO_2 排放表现出显著差异:制造业部门,能源部门和炼油转化部门 CO_2 排放水平在高温热浪时提高,运输部门在高温热浪期间的 CO_2 排放水平则有所降低.

关键词：高温热浪；WRF-STILT 模型；CO_2 排放；空间代表性；杭州市
中图分类号：X511 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-3634-10

The variation characteristics and analysis of atmospheric CO_2 concentration during heatwave in Hangzhou. YANG Zhong-hao[1], XIAO Wei[1*], ZHU Meng-jing[2], HU Chen[3], HU Ning[4], YANG Ying[1], HUANG Wen-jing[1], SHAN Meng[2], LEE Xu-hui[5] (1.Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Key Laboratory of Ecosystem Carbon Source and Sink-China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China；2.Zhejiang Lin'an Atmospheric Background, National Observation and Research Station, Hangzhou 311300, China；3.Department of Ecology and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210018, China；4.Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China；5.School of the Environments, Yale University, New Haven CT 06511, American). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：3634~3643

Abstract：To clarify the variation characteristics and causes of urban atmospheric CO_2 concentrations during heatwave periods, this study investigates Hangzhou—a typical city in the Yangtze River Delta—using the WRF-STILT atmospheric transport model, the EDGAR anthropogenic emission inventory, high-precision laser spectrometer observations, and a Bayesian optimization inversion algorithm. Results show that heatwaves significantly affect atmospheric CO_2 concentrations: daytime concentrations are lower, while nighttime concentrations are higher compared to non-heatwave periods. The spatial representativeness of measurement sites and changes in CO_2 emissions are the main factors influencing atmospheric CO_2 levels in Hangzhou. Heatwaves also lead to notable changes in spatial representativeness: during heatwaves, local emissions account for 80.5% of the observed CO_2 compared to only 51.6% during non-heatwave periods, and representative spatial range is smaller. In addition, CO_2 emissions from various anthropogenic sectors respond differently to heatwaves: emission from the manufacturing, energy, and refining and conversion sectors increase, while emissions from transportation decreases.

Key words：heatwave；WRF-STILT model；CO_2 emission；spatial representativeness；Hangzhou

---

收稿日期：2024-11-15
基金项目：江苏省杰出青年基金项目(BK20220055);江苏省“333 人才”领军型人才团队(BRA2022023);国家自然科学基金项目(U24A20590,42005143);浙江临安大气成分本底国家野外科学观测研究站开放研究课题(LAZD202503);中国气象局生态系统碳源汇重点开放实验室(ECSS-CMA202302)
* 责任作者, 教授, wei.xiao@nuist.edu.cn

全球变暖导致高温热浪事件的频率和强度明显增加,CO_2 作为温室气体的主要组成部分,是全球变暖的主要驱动因素[1-2].高温热浪不仅对全球生态系统、经济和人类健康造成严重威胁[3-6],同时也对大气 CO_2 产生显著影响[7-8].人为 CO_2 排放是大气 CO_2 的主要贡献源,为准确评估高温热浪的影响,需要准确量化人为 CO_2 排放,量化方法分为自下而上法[9-10]和自上而下法[11-14].目前,高温热浪对大气 CO_2 影响的研究大多使用自下而上的排放清单方法从排放源角度核算 CO_2 排放情况[15-17],而使用大气 CO_2 浓度观测数据对排放清单进行约束形成自上而下方法来研究高温热浪对大气 CO_2 影响的研究未见报道.

此外,准确评估高温热浪对大气 CO_2 的影响仍存在诸多难点问题.排放清单的制作通常基于长期统计数据,并且清单的时间分辨率较大,可以代表一般排放水平,而高温热浪的发生通常会在短期内使得能源需求激增[18]、能源结构转变[19]、工业活动受限[20]和人们出行活动方式转变[21]等,排放清单无法准确解析 CO_2 排放量在高温热浪短期内的显著波动过程.排放清单也存在区域尺度上时空分布不准确的问题[22].自上而下法能够有效降低区域尺度排放反演的不确定性[23-25],但 CO_2 在大气中长时间存留并随大气运动传输,导致同一观测位置的贡献源区在不同扩散条件下差别巨大[26-27].高温热浪过程通常伴随着大尺度气候系统与局地气象要素的异常变化[28],导致观测数据能代表多大范围的排放情况存在较大不确定性问题.

杭州市是长三角城市群中碳排放水平最高的一类城市,同时也是现代化国际大城市减污降碳协同创新试点城市[29].因此,本文选取杭州市作为研究区域,针对 2022 年 6~8 月发生的高温热浪事件过程中 8 月份高温热浪和非高温热浪时段,提出一种基于拉格朗日原理大气传输模型融合观测数据与排放清单的方法来优化传统的自上而下法,通过大气传输模型准确量化高温热浪对观测站点的空间代表性的影响,并使用高精度与时间分辨率大气 CO_2 浓度观测数据对高温热浪时期排放清单进行降尺度订正,来反演高温热浪时期大气 CO_2 浓度,解析高温热浪时期人为源排放 CO_2 的变化,探究 CO_2 排放与大气 CO_2 浓度关系.以期揭示高温热浪时期城市大气 CO_2 浓度变化特征,明确高温热浪对观测站点空间代表性的影响,为制定高温热浪期间人为源 CO_2 排放管理方法提供参考.

1　材料与方法

1.1　大气 CO_2 浓度观测数据和辅助数据

1.1.1　大气 CO_2 浓度观测数据　杭州市大气 CO_2 浓度数据来源于杭州国家基准气候站,该站位于杭州市中心(30.22°N,120.17°E,海拔 43.2m).采用基于光腔衰荡激光光谱技术的 $CO_2/CH_4/H_2O$ 分析仪(型号 G2301; Picarro Inc., Santa Clara, CA, USA)连续测量大气 CO_2 浓度,采样口安装在主观测台高约 15m 的观测塔上,距地面约 25m.该站的大气 CO_2 浓度能较好地代表均匀混合后的杭州市大气 CO_2 浓度特征[30].

1.1.2　大气 CO_2 浓度背景值　使用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)位于与那国岛的区域大气本底站(YON,123.01°E,24.47°N,海拔 30m)提供的大气 CO_2 浓度背景值数据.该站点位于与那国岛北海岸,属于亚热带气候区,夏季主要受西南风影响,位于本研究区域的上风向.选取 YON 观测站小时尺度的 CO_2 浓度数据作为本研究区域的大气 CO_2 浓度背景值.

1.1.3　气象数据　气象数据来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的第五代再分析数据集 ERA5 数据集 (https://cds.climate.copernicus.eu/datasets). ERA5 数据集结合全球观测数据与模式数据,生成了完整的全球气象数据集.本研究选取地面 2m 气温数据,水平空间分辨率为 0.25°×0.25°的,时间分辨率为 1h.

1.2　清单数据介绍

人为源排放清单使用全球大气研究排放数据库 (EDGAR−Emissions Database for Global Atmospheric Research)V8.0 版 (https://edgar.jrc.ec.europa.eu/dataset_ghg80).EDGARV8.0 根据 IPCC 最新指南和活动数据,利用 2023 年 9 月发布的最新数据,统计每个国家 1970~2022 年期间所有部门的温室气体排放数据,最终形成包含共计 20 种化石燃料燃烧和生物质燃烧数据(表 1),数据空间分辨率为 0.1°×0.1°,时间分辨率为月.

净生态系统 CO_2 交换和生物质燃烧 CO_2 排放数据来自 Carbon Tracker 全球大气 CO_2 模型估算的 CO_2 通量,时间分辨率为 3h,空间分辨率为 0.1°×0.1°.

使用线性内插的方法将时间分辨率转化为 1h.

表 1 排放部门分类

Table 1 Classification of emission sectors

英文全称	缩写	中文全称
Agricultural soils	AGS	农业用地
Chemical processes	CHE	化学过程
Power Industry (*)	ENE	能源部门
Combustion for manufacturing (*)	IND	制造业燃烧
Iron and steel production	IRO	钢铁生产
Non energy use of fuels	NEU	非能源燃料的使用
Non-ferrous metals production	NFE	有色金属生产
Non-metallic minerals production	NMM	非金属矿生产
Fuel exploitation (*)	PRO_FFF	燃料开采
Solvents and products use	PRU_SOL	溶剂和产品的使用
Energy for buildings (*)	RCO	建筑能源
Oil refineries and Transformation industry (*)	REF_TRF	炼油厂和转型工业
Solid waste incineration (*)	SWD_INC	固体废物燃烧
Aviation climbing_and_descent	TNR _CDS:	航空飞行的上升和下降
Aviation cruise	TNR _CRS	航空飞行巡航
Aviation landing and takeoff	TNR_ LTO	航空飞行的着陆和起飞
Railways, pipelines, off-road transport (*)	TNR_Other	铁路运输、管道运输和非公路运输
Shipping (*)	TNR_Ship	船运
Road transportation (*)	TRO	道路运输
Agricultural waste burning (*)	AWB	农业废物燃烧

注:*含有生物质燃烧排放.

1.3 WRF-STILT 模型介绍

使用 WRF-STILT 模型对大气 CO_2 增量进行模拟.中尺度天气预报模式(WRF)能够提供较为准确的气象场[31],并能够输出相对湿度、风速和边界层高度等气象要素.因此利用 WRF 模式 V4.2 模拟气象场并提供给拉格朗日大气扩散模型(STILT).WRF 模型选择的初始气象场和边界气象条件采用美国国家环境预测中心(NCEP)的全球分析资料(Final Operational Global Analysis,FNL).模式采用多层嵌套和双向反馈的方式,区域 01 空间分辨率为 27km×27km;区域 02 空间分辨率为 9km×9km(图 1);时间步长为 60s.模式配置的物理过程参数化方案如表 2 所示.

使用的STILT模型是基于拉格朗日粒子随机游走理论的大气传输模型[32].其原理是:在观测站点位置释放出大量粒子,通过计算粒子在研究区域内的数量及停留时间,模拟出在气象场驱动下各个网格点对观测站点 CO_2 浓度的影响权重,将其定义为足迹权重(foot):

$$\mathrm{foot}\left(x_r,t_r \mid x_i,y_j,t_m\right)=\frac{m_{\mathrm{air}}}{h\rho\left(x_i,y_j,t_m\right)}\frac{1}{N_{\mathrm{tot}}}\sum_{p=1}^{N_{\mathrm{tot}}}\Delta t_{p,i,j,k} \tag{1}$$

式中:foot 为模拟过程中格点(x_i, y_j)在时间(t_m)的 CO_2 通量对观测站点大气 CO_2 浓度的影响,单位 10^{-6} (m·s/μmol);m_{air} 为干空气摩尔质量;h 为对下垫面有影响的大气层高度,模型一般认为是边界层高度的一半,m;ρ为影响层高度以下粒子密度;N_{tot} 为释放的粒子数,本文设定 N_{tot}=500;$\Delta t_{p,m,i,j,k}$ 表示每一个粒子(p)随时间步长(m)在某一格点空间内(i,j,k)停留的总时间.

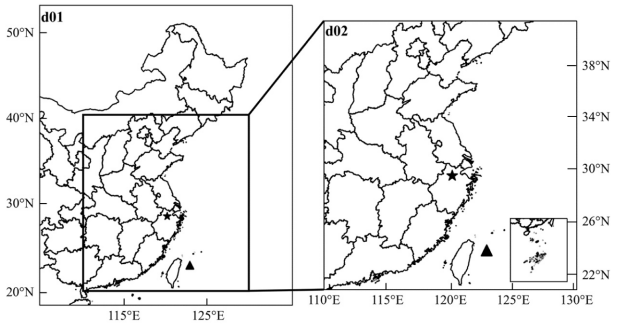


图 1 WRF 模型模拟区域(方框)、杭州温室气体观测站(五角星)点和大气本底站(三角形)位置

Fig.1 The WRF model simulation area (box), greenhouse gas observation station locations in Hangzhou (five-pointed star), and atmospheric background station locations (triangle)

审图号:GS(2024)0650 号

表 2 WRF 模式物理过程参数化方案配置

Table 2 Configuration of physical process parameterization schemes in the WRF model

方案类别	方案选择
微物理过程	WSM3
长波辐射	RRTM
短波辐射	Dudhia
近地面层	Monin-Obukhov
陆面过程	Noah
边界层	YSU
积云参数化	Kain-Fritsch

大气 CO_2 浓度模拟值由 3 部分组成:大气 CO_2 浓度背景值,人为源大气 CO_2 浓度贡献量和净生态系统 CO_2 交换贡献量:

$$\mathrm{CO}_{2,\text{模拟值}}=\Delta\mathrm{CO}_{2,\text{人为源贡献}}+\Delta\mathrm{CO}_{2,\text{自然源贡献}}+\mathrm{CO}_{2,\text{背景值}} \tag{2}$$

式中:ΔCO_2 为模拟足迹权重(foot)与排放清单中 CO_2 通量相乘得到的贡献值,计算过程如式(3)所示:

$$\Delta CO_2 = \sum_{i=1}^{n}\left[\text{foot}_i \cdot \left(\text{flux}_{CO_2}\right)_i\right] \tag{3}$$

式中:n 为对任一时刻模拟的 CO_2 增加量有贡献的累积时间,i 为 n 小时中的任意一个时刻,foot_i 为第 i 时刻模型模拟出的足迹权重,$(\text{flux}_{CO_2})_i$ 为第 ih 研究区域内的 CO_2 通量.研究发现 168h 能够充分累积对观测点大气 CO_2 浓度有影响的贡献,因此本研究将模型中的 n 设为 168h,时间步长为 1h[31].

1.4　贝叶斯反演优化比例因子

本研究采用比例因子优化的稀疏特征贝叶斯反演(SFBI)方法,通过最小化代价函数 $J(\Gamma)$的方法来求解比例因子.代价函数 $J(\Gamma)$可表示为:

$$J(\Gamma)=\frac{1}{2}\left[(\gamma-\boldsymbol{K}\Gamma)^T\boldsymbol{S}_e^{-1}(\gamma-\boldsymbol{K}\Gamma)+(\Gamma-\Gamma_a)^T\boldsymbol{S}_a^{-1}(\Gamma-\Gamma_a)\right] \tag{4}$$

式中:Γ为求解的比例因子(SF);$\boldsymbol{y}$ 为观测到的 CO_2 浓度的增量;$\boldsymbol{K}$ 为雅可比矩阵;$\boldsymbol{S}_e$ 为观测值和模拟值构建的误差协方差矩阵;$\boldsymbol{S}_a$ 为先验和后验通量的误差.SF 的取值是评价模型模拟与实际观测差异的重要指标:当 SF>1 时,表明先验排放清单中相应部门的排放通量被低估,此时需要将该部门的排放通量乘以 SF,以提高其模拟排放值,反之亦然[32].在贝叶斯优化算法下,需要对先验数据和观测数据的误差协方差矩阵和状态向量进行估计,根据研究[33]设定测量误差、STILT 模型释放的有限粒子数和气象场的不确定度分别为 10%、13%和 20%.

1.5　高温热浪事件判别标准

使用地面 2m 高度的温度数据对高温热浪过程进行判别.高温热浪的判别标准以中国气象局的高温预警信号为参照,将日最高气温超过 35℃且持续时间超过 3d 的时期定义为高温热浪时期[34](HW),其他时期定义为非高温热浪时期(NOHW).利用上述高温热浪判别标准,杭州市 2022 年夏季经历了长达 62d 的高温热浪过程.研究时段为 2022 年 8 月.选取 8 月是因为排放清单在 1 个月内是一致的,反演结果主要反映高温热浪所带来的影响.同时,该时段前 23d 处于本次高温热浪的末期,且这一时段构成了一个未中断的高温热浪过程,能够有效积累该过程对 CO_2 排放的长期影响,高温热浪对碳排放的影响机制趋于稳定.此外,该时段后 8d 为非高温热浪过程,通过在 1 个月中对比高温热浪过程与非高温热浪过程,能够揭示高温热浪对碳排放的影响.

2　结果与分析

2.1　大气 CO_2 浓度变化特征

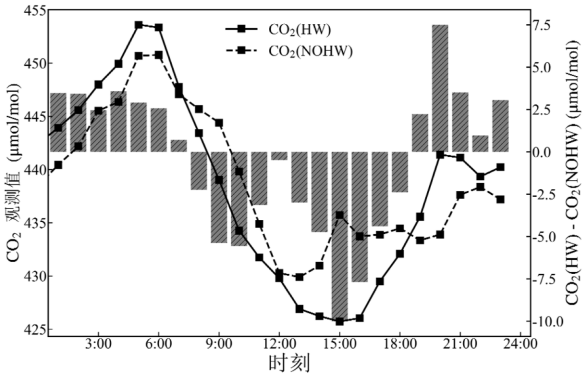


图 2　大气 CO_2 浓度观测值的日变化

Fig.2　Diurnal variation of atmospheric CO_2 concentration

2022 年 8 月高温热浪时期,最高气温为 42.0℃,出现于 19 日的下午 16:00,最低气温为 26.8℃,出现于 7 日的凌晨 4:00,平均温度为 34.3℃,相较于非高温时期平均气温高出 5.3℃.大气 CO_2 浓度最高值为 484.8μmol/mol,出现于 19 日的早上 6:00,最低浓度为 419.0μmol/mol,出现于 20 日的下午 15:00,平均浓度为 438.2μmol/mol,大气 CO_2 浓度呈现出显著的昼夜差异.与非高温热浪时期相比,日间 CO_2 浓度显著降低,而夜间浓度则明显升高.具体而言,高温热浪期间日间平均大气 CO_2 浓度为 431.7μmol/mol,较非高温热浪时期降低了 3.9μmol/mol.夜间平均浓度为 445.6μmol/mol,较非高温热浪时期增加了 3.2μmol/mol.从日变化特征来看,CO_2 浓度差异在 15:00 达到最大,高温热浪时期较非高温热浪时期低 10.0μmol/mol;而夜间差异峰值出现在 20:00,高温热浪时期较非高温热浪时期高 7.5μmol/mol(图 2).

2.2　大气 CO_2 浓度模拟

上述结果表明,高温热浪对日间和夜间杭州市的大气 CO_2 浓度影响不同.为解析高温热浪的作用机制,基于 WRF−STILT 模型和 EDGAR 先验排放清单对小时尺度大气 CO_2 浓度进行了正演模拟,能够

较好地捕捉大气 CO_2 浓度的时间演变特征(图 3a).仅在个别时段内模拟值和观测值之间存在偏差.如 8 月 12 日至 8 月 15 日期间,模拟值明显低于观测值.小时尺度上的模拟值与观测值相关系数 r 为 0.51 (P<0.01),均方根误差(RMSE)为 12.8μmol/mol 一致性指数(IoA)为 0.682(图 3b),表明模拟值能够在一定程度上反映出观测值的变化趋势.根据 EDGAR 提供人为源排放部门分类,杭州市大气 CO_2 浓度的贡献排名前 4 的排放部门分别为制造业部门(IND)、能源部门(ENE)和运输部门(TRO)、炼油与转化部门(REF_TRF),其排放占比分别 23.2%、22.0%、17.0%、15.6%,总占比为 77.8%.

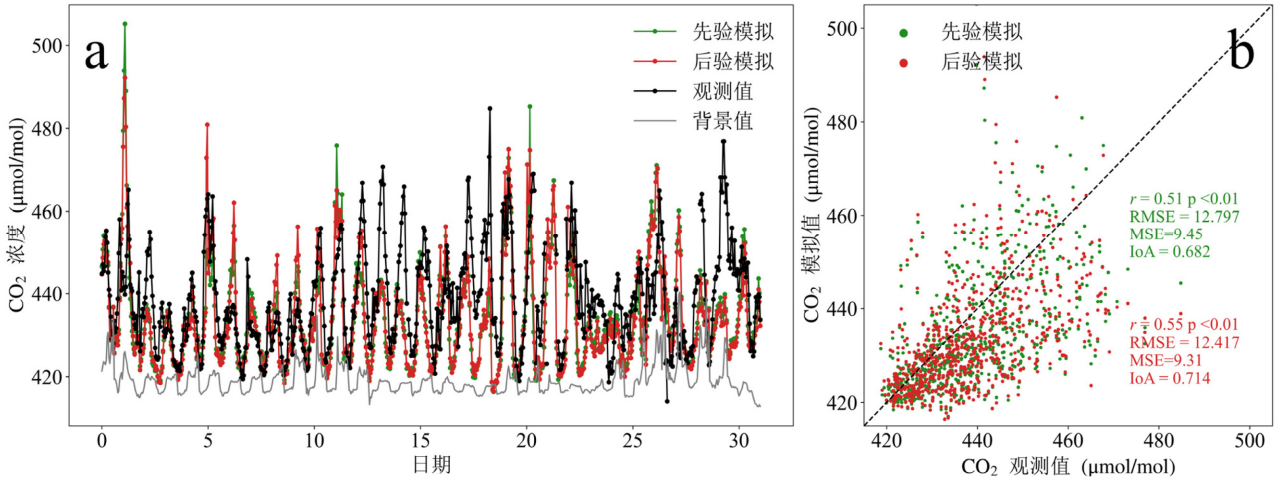


图 3 杭州 8 月份大气 CO_2 浓度的观测值、先验和后验模拟值的时间序列(a)和 1:1 图(b)

Fig.3 Time series (a) and 1:1plot (b) of observed, prior-simulation and post-simulation atmospheric CO_2 concentrations in Hangzhou for August

表 3 贝叶斯优化清单结果

Table.3 Results of bayesian optimization for emission inventory

参数	IND	ENE	TRO	REF_TRF
SF_HW	1.21	1.41	0.86	1.02
SF_NOHW	1.11	1.04	1.07	0.99
高温热浪时期排放变化 [mg/(m^2·s)]	+0.0018	+0.0123	−0.0009	+0.0004
高温热浪时期变化比例(%)	+10	+37	−21	+3

通过高精度激光光谱分析仪的观测数据对正演模拟结果进行定量约束,并使用贝叶斯优化算法对 4 个排放部门进行优化的结果表明:制造业部门、能源部门和炼油与转化部门在高温热浪期间 CO_2 排放量分别增加了 0.0018,0.0123,0.0004mg/(m^2·s),排放清单对这 3 部门在高温热浪时期的排放水平存在低估,其中能源部门低估最为严重,达到 37%.交通部门在高温热浪时期排放降低了 0.0009mg/(m^2·s),排放清单将其高估了 21%.其他部门信息如表 3 所示.

基于比例因子优化后的排放清单反演模拟的大气 CO_2 浓度相较于基于先验清单的结果明显提高(图 3b).后验模拟与实际观测数据的 r 达到了 0.55 (P<0.01), RMSE 为 12.4μmol/mol, IoA 达到 0.714,有效提高了模型的准确性(图 3b).因此,基于拉格朗日原理大气传输模型融合观测数据与排放清单的方法来优化传统的自上而下法来反演大气 CO_2 变化,能够有效捕捉高温热浪对大气 CO_2 浓度的影响.相较于之前长三角地区碳排放的研究[26],本研究所使用的后验排放排放清单能够更好地反映大气 CO_2 浓度的空间分布和变化趋势,数值更为精确,模型的表现得到了改进.因此,判断在高温热浪等极端天气事件或特殊人为活动事件发生时,清单的不确定性会大大增加,需要增加高精度观测数据加以约束.

2.3 人为源排放对大气 CO_2 浓度影响

将不同部门的排放对杭州大气 CO_2 浓度影响按日变化进行拆解,发现 4 种排放部门在高温热浪与非高温热浪时期均体现出显著的日间低夜间高的日变化趋势(图 4a).然而,不同部门日变化振幅不同,在高温热浪时期:炼油转化部门日变化振幅最大

(0.6~7.9μmol/mol), 能源部门日变化振幅最小(1.9~6.3μmol/mol).在非高温热浪时期:能源部门日变化振幅最大(2.9~7.9μmol/mol),运输部门日变化振幅最小(3.0~5.0μmol/mol),这导致了白天和夜间大气 CO_2 浓度影响因素不同(图 4b).白天制造业部门和能源部门是杭州大气 CO_2 浓度的主要影响因子,而晚上运输部门和炼油转化部门的贡献明显提升,四种部门的影响程度相当.

不同部门在高温热浪与非高温热浪时期的排放对杭州大气 CO_2 浓度贡献不同.制造业部门、运输部门和炼油转化部门排放贡献表现出高温热浪时期低于非高温热浪时期,而能源部门则表现为高温热浪时期低于非高温热浪时期.其中,高温热浪时期日间能源部门排放贡献明显低于非高温热浪时期,在夜间炼油转化部门在高温热浪时期相较于非高温热浪明显增多.因此,不同部门的排放日变化是高温热浪期间的日间大气 CO_2 浓度低于非高温热浪时期而夜间的 CO_2 浓度高于非高温热浪时期的主要原因.

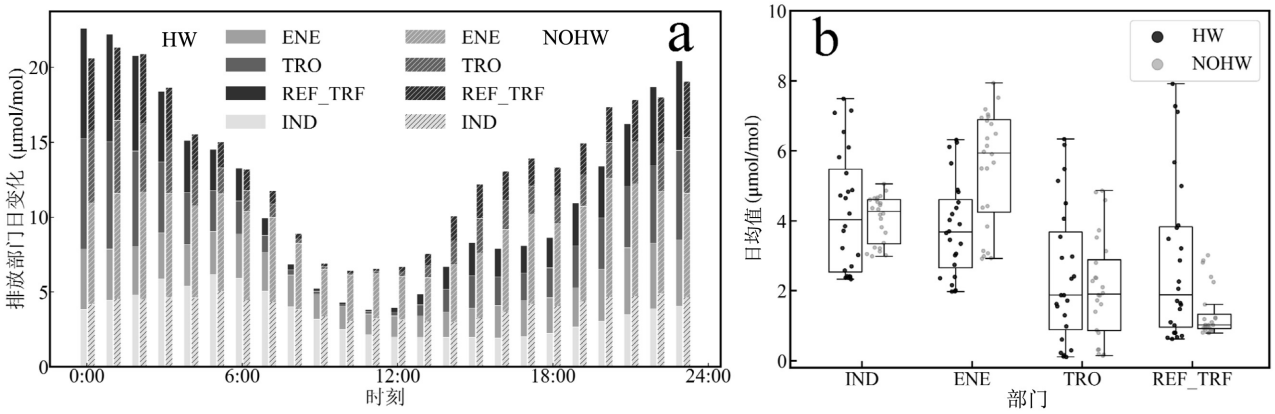


图 4　排放部门日变化(a)及排放部门日均值(b)

Fig.4　Schematic of daily variations in emission sectors (a), box plot of daily average values of emission sectors (b)

3　讨论

3.1　高温热浪对观测站点空间代表性的影响

杭州国家基准气候站观测到的大气 CO_2 浓度主要来源于观测站点周边区域,特别是浙江省范围内.随着距离观测站点的接近,CO_2 的贡献强度显著增加.东南和西南方向是 CO_2 的主要来源方向,强贡献源区集中在浙江、江西和福建等省份(图 6a).

高温热浪时期,CO_2 的足迹权重表现为东南和西南方向的贡献增强,而来自西北方向的贡献则有所减弱.如图 6c 所示,约 80.5%的 CO_2 浓度贡献源区位于浙江省内,平均每小时贡献约 11.4μmol/mol,而来自省外的贡献仅占 19.5%,每小时贡献总和仅为 2.8μmol/mol,远低于省内的贡献.这表明高温天气下大气 CO_2 浓度的空间代表性更小.从大尺度气候系统的角度来分析,该时期杭州主要受到南方的西北太平洋副热带高压和暖湿空气控制,导致温度升高,扩散作用减弱[35].因此,高温天气通常伴随着较强的稳定天气条件,减少了大气的垂直混合,导致气体在局地积累[28].相比之下,在非高温热浪时期,强贡献区域更多来自上海、江苏和安徽等地,空间代表性增大.非高温热浪时期浙江省内的贡献显著下降(图 6b),仅占 51.6%,与高温热浪时期相比,下降了约 28.9%.同时,来自浙江以北的上海市、江苏省和安徽省的贡献显著增加,上海市、江苏省和安徽省在非高温热浪时期贡献相较于高温热浪时期分别增大约 7.4%、14.1%和 6.6%.这一变化的主要原因是由于非高温热浪时期大气环流条件发生了显著变化.非高温热浪时期杭州主要受东北方向海洋上的相对较冷空气影响,温度相对较低,大气平流显著增强,气流水平输送能力大幅提高,排放的 CO_2 被更快地扩散到周边区域,导致本地对 CO_2 浓度的贡献减弱,而外部区域的贡献则逐渐增大,这种差异在日间更为明显(表 4).进一步分析发现,高温热浪期间日间气温和相对湿度的平均值为 36.8 ℃和 45 %,非高温热浪期间日间气温和相对湿度的平均值为 29.5℃和 55%.与非高温热浪时期相比,高温热浪期间日间气温平升高

了 7.3℃,相对湿度下降了 10%(图 5a),体现出明显的高温低湿环境.高温热浪期间日间边界层高度和风速的平均值为 1373.1m 和 1.6m/s,非高温热浪期间日间边界层高度和风速的平均值为 1051.5m 和 2.3m/s.与非高温热浪时期相比,高温热浪期间日间边界层高度的平均值升高了 321.6m,平均风速下降了 0.7m/s (图 5b),使得高温条件下空间代表性相较于非高温热浪时期更大.

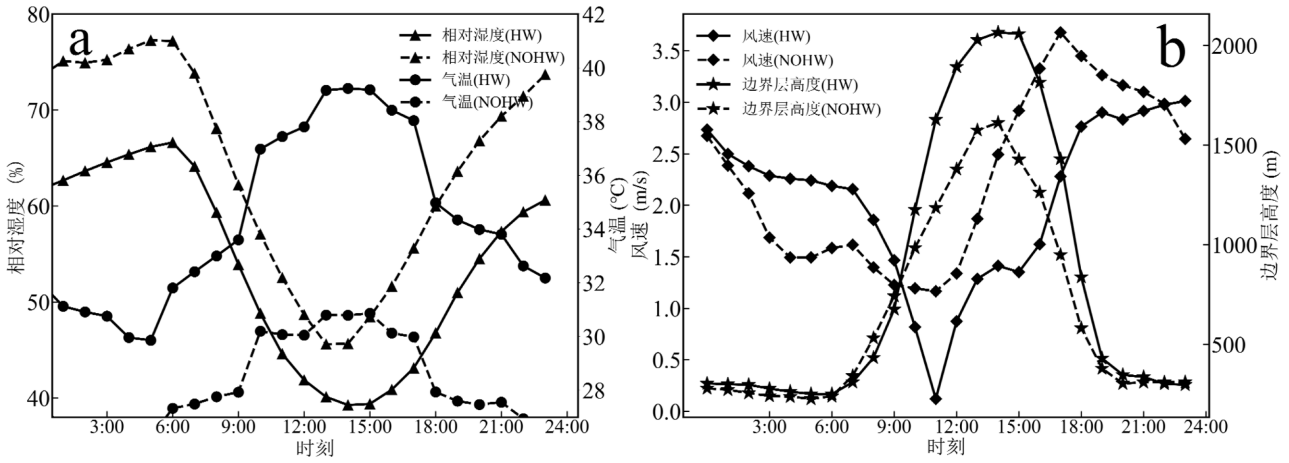


图 5 大气相对湿度和气温(a)与边界层高度和风速(b)观测值的日变化

Fig.5 Diurnal variation of a air temperature and relative humidity(a),boundary layer height, and wind speed (b)

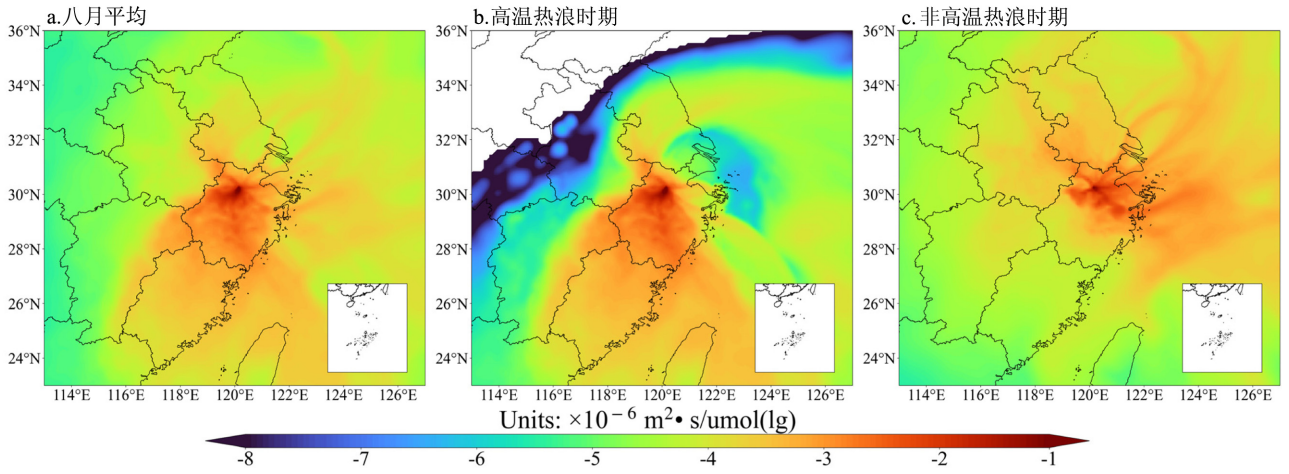


图 6 2022 年 8 月足迹权重

Fig.6 Footprint weight maps for August 2022: the entire month

审图号:GS(2024)0650 号

杭州国家基准气候站日间和夜间的空间代表性也存在不同,如表 4 所示,高温热浪与非高温热浪的日间局地贡献分别为 71.9%和 44.8%,低于夜间 84.2%和 55.8%,说明日间杭州国家基准气候站具有更大的空间代表范围.高温热浪和非高温热浪时期的日间与夜间空间代表性与局地气象要素有直接关系.如图 5 所示,日间高温热浪与非高温热浪时期均体现出温度高、湿度低、风速低、边界层高度高的特征,这使得边界层内水平运动减弱,垂直湍流混合加强,导致日间空间代表性大于夜间.

大尺度气候系统和局地气象要素的变化都会使大气 CO_2 浓度的空间代表性产生巨大变化.因此,利用大气CO_2浓度对区域CO_2排放水平进行评估时要重点关注浓度的空间代表性问题.

表 4　不同省份在高温热浪与非高温热浪时期的空间代表性

Table 4　Spatial representativeness of different provinces during heatwaves and non−heatwave periods

省份	HW 日间		HW 夜间		NOHW 日间		NOHW 夜间	
	浓度贡献 (μmol/mol)	占比 (%)	浓度贡献 (μmol/mol)	占比 (%)	浓度贡献 (μmol/mol)	占比 (%)	浓度贡献 (μmol/mol)	占比 (%)
浙江	6.40	71.9	16.49	84.2	5.78	44.8	11.39	55.8
福建	0.87	9.8	1.04	5.3	0.09	0.7	0.13	0.6
江苏	0.34	3.8	0.64	3.3	1.83	14.2	3.95	19.4
江西	0.17	1.9	0.17	0.9	0.18	1.4	0.11	0.6
安徽	0.08	0.9]	0.11	0.6	1.71	13.3	0.73	3.6
上海	0.01	0.1	0.01	0.1	0.33	2.5	0.82	4.0
其他	1.00	11.2	1.14	5.8	3.02	23.4	3.22	15.8

3.2　高温热浪对人为源排放的影响

基于贝叶斯优化排放清单的结果表明,制造业部门、能源部门和炼油与转化部门在高温热浪期间比 CO_2 排放呈现出增大的趋势.

对于制造业部门来说,高温热浪时期排放增大 0.0018mg/(m^2·s).杭州市的制造业主要包括智能装备,现代纺织等九大标志性产业链,根据后验 EDGAR 排放清单核算,杭州市制造业高温热浪时期排放为 0.0413mg/(m^2·s).高温会对生产过程产生负面影响.高温热浪会影响工人的生产效率和健康,工业产出会显著降低[20].为了完成同样生产活动,需要更多的生产消耗,增加了碳排放

对于能源部门来说,高温热浪时期排放增大 0.0123mg/(m^2·s).高温天气通常会引起制冷需求的显著上升[36],根据中国电力企业联合会的统计及数据中心[37]的数据,2022 年 8 月中国城乡居民用电量同比增长了 33.5%.与此同时,高温天气对电厂发电效率产生不利影响[38],导致能源部门需要提高化石燃料的消耗,特别是对煤炭的依赖以满足电力需求激增[39].根据国家统计局统计[40],浙江省 2022 年 8 月浙江省发电总量为 451.8 亿 kW·h,同比增长 11.8%.此外,高温对水力和核能等清洁能源的供应也有不利影响[41],水力发电量和核能发电量分别同比减少 30.3%和 1.7%,电力消耗模式和能源结构受到影响[42].随着清洁能源的可用性下降,对传统化石燃料的依赖度呈现上升趋势[43],火力发电量同比增长 15.5%.

对于炼油转化部门来说,高温热浪时期排放增大 0.0004mg/(m^2·s).2022 年 8 月浙江省原油加工量为 88.4 万吨,同比增长 52.9%,同时在炼油和转化过程中反应器和蒸馏塔等设备,需要依赖冷却系统来保持正常运行温度,高温天气会导致冷却系统效率降低,设备需要更多能量来维持适宜的工作温度,进而增加碳排放[44].同时,炼油与转化工艺通常是高度优化的[45],而极端高温天气条件下,优化控制策略可能失效,进一步导致工厂的能效下降和排放增加.因此,高温热浪会使得炼油与转化部门的碳排放增加.

相比之下,运输部门在高温热浪期间的排放降低 0.0004mg/(m^2·s).根据交通运输部统计[46],2022 年 8 月浙江省公路客运量和旅客周转量分别同比减少 32.1%和 28.9%.高温热浪时期会改变人们的出行方式和频率,如增加公共交通工具的使用而减少私家车的使用[21],减少外出活动等.因此,运输部门在高温热浪时期的排放会有所减少.

3.3　CO_2 排放与大气 CO_2 浓度关系

基于高精度观测数据对排放清单订正的结果表明,制造业部门、能源部门和炼油转换部门在高温热浪时期都表现出 CO_2 排放量的增加,特别是能源部门排放量增加了 37%.然而,对杭州市大气 CO_2 浓度的分析结果表明,制造业部门和能源部门在高温热浪时期的影响要低于非高温热浪时期.

为进一步剖析 CO_2 排放增大但对大气 CO_2 浓度增量贡献降低的问题,我们对排放清单的空间分布情况进行了分析,发现制造业部门和能源部门的排放热点集中在上海市和江苏省的附近地区附近,位于杭州的东北方向(图 7).然而,高温热浪时期的足迹主要分布在杭州的偏南方向(图 6c),此时上海市和江苏省的附近地区不是杭州大气 CO_2 浓度的主要贡献源区,仅有约 0.1%和 3.3%的空间代表性.非高温热浪时期的足迹在杭州的东北方向明显增大(图 6b),上海市和江苏省的足迹增大为 3.5%和 17.3%.虽然高温热浪时期制造业部门和能源部门排放量增大,

但没有落在主要贡献源区内,因此对杭州大气 CO_2 浓度增量减小.相反,非高温热浪时期东北方向的贡献源区明显增大,空间范围能够覆盖上海市和江苏省附近地区的制造业部门和能源部门的排放热点.因此,这两个部门的在非高温热浪时期对杭州大气 CO_2 浓度的影响要大于非高温热浪时期.综上,在评估区域 CO_2 排放时,需要综合考虑排放源的排放量和观测站点的空间代表性.

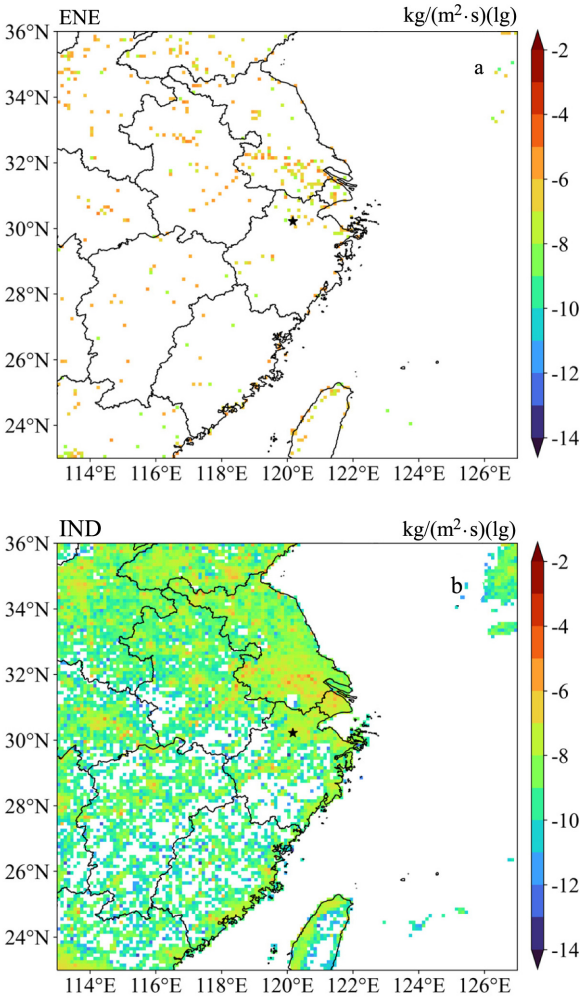


图 7 EDGAR 清单中能源 (a)与制造业部门(b)空间分布

Fig.7 Spatial distribution of the energy sector (a) and the manufacturing sector (b) in the EDGAR inventory

审图号:GS(2024)0650 号

4 结论

4.1 高温热浪期间杭州市日间大气 CO_2 浓度低于非高温热浪时期,夜间浓度则高于非高温热浪时期,其主要影响机制是观测站点的空间代表性和CO_2排放变化.

4.2 高温热浪对观测站点空间代表性产生显著影响,高温热浪时期观测站点空间代表性低于非高温热浪时期,日间空间代表性大于夜间.

4.3 高温热浪对不同部门 CO_2 排放产生显著影响,制造业、能源和炼油转化部门排放增多,运输部门排放减少,本研究基于观测数据对排放清单进行了订正,并量化了部门排放影响的日变化特征.

参考文献:

[1] Hansen J, Johnson D, Lacis A, et al. Climate impact of increasing atmospheric carbon dioxide [J]. Science, 1981,213(4511):957-966.

[2] 周天军,张文霞,陈德亮,等.2021 年诺贝尔物理学奖解读:从温室效应到地球系统科学 [J]. 中国科学:地球科学, 2022,52(4):579-594.
Zhou T, Zhang W, Chen D, et al. Understanding and building upon the pioneering work of Nobel Prize in Physics 2021 laureates Syukuro Manabe and Klaus Hasselmann: From the greenhouse effect to Earth system science and beyond [J]. Science China Earth Sciences, 2022, 65(4):589-600.

[3] Zhang K, Cao C, Chu H, et al. Increased heat risk in wet climate induced by urban humid heat [J]. Nature, 2023,617(7962):738-742.

[4] Vellinga P, Swart R. The greenhouse marathon: a proposal for global strategy [J]. Climatic Change, 1991,18(1):7-12.

[5] Zhang W, Zhou T, Zou L, et al. Reduced exposure to extreme precipitation from 0.5°C less warming in global land monsoon regions [J]. Nature Communications, 2018,9(1):3153.

[6] Zhang W, Zhou T. Increasing impacts from extreme precipitation on population over China with global warming [J]. Science Bulletin, 2020, 65(3):243-252.

[7] Richard A, Chris D, Ralph K, et al. Mauna Loa carbon dioxide forecast for 2025[Z]. https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/long-range/forecasts/co2-forecast-for-2025.

[8] Marten S, Victor B, Peter M. Positive feedback between global warming and atmospheric CO_2 concentration inferred from past climate change [J]. Geophysical Research Letters, 2006,33(10):10702.s.

[9] Spokas K, Bogner J, Corcoran M. Modeling landfill CH_4 emissions [J]. Elementa: Science of the Anthropocene, 2021,9(1):00050.

[10] Li T, Canadell J, Yang X, et al. Methane emissions from wetlands in China and their climate feedbacks in the 21st century [J]. Environmental Science & Technology, 2022,56(17):12024-12035.

[11] 朴世龙,何 悦,王旭辉,等.中国陆地生态系统碳汇估算:方法、进展、展望 [J]. 中国科学:地球科学, 2022,52(6):1010-1020.
Piao S, He Y, Wang X, et al. Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink:Methods, progress and prospects [J]. Science China Earth Sciences, 2022,65(4):641-651.

[12] Wang Y, Tian X, Duan M, et al. Optimal design of surface CO_2 observation network to constrain China's land carbon sink [J]. Science Bulletin, 2023,68(15):1678-1686.

[13] 杨 樱,马心怡,黄文晶,等.基于 WRF-STILT 模式反演长三角大气 CO_2 排放 [J/OL]. 中国环境科学, DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250210.004.
Yang Y, Ma X, Huang W, et al. Inversion of atmospheric CO_2 emissions in Yangtze River Delta based on WRF-STILT model [J/OL]. China Environmental Science, DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20250210.004.

[14] 胡　诚,张俊清,刘慧丽,等.城市尺度温室气体排放量的反演研究进展及未来发展趋势 [J]. 中国环境科学, 2024,44(12):7036-7045.
Hu C, Zhang J, Liu H, et al. Review of the greenhouse gas emission inversion approaches at city scale and future development trends [J]. China Environmental Science, 2024,44(12):7036-7045.

[15] Gao Y, Wang S, Chen L, et al. Achieving accurate regional carbon-sink accounting and its significance for “missing” carbon sinks [J]. The Innovation, 2024,5(1):100552.

[16] 刘金平,任艳群,陶　辉,等.中国高温热浪对碳排放量的响应 [J]. 中国环境科学, 2022,42(1):415-424.
Liu J, Ren Y, Tao H, et al. The response of heatwave to carbon emission in China [J]. China Environmental Science, 2022,42(1)415-424.

[17] Jiang L, Yang L, Wu Q, et al. How does extreme heat affect carbon emission intensity? Evidence from county-level data in China [J]. Economic Modelling, 2024,139:106814.

[18] Tan J, Wang J, Wang H, et al. Influence of extreme 2022 heatwave on megacities' anthropogenic CO_2 emissions in lower-middle reaches of the Yangtze River. 2024,951(15):175605.

[19] Meier P, Holloway T, Patz J, et al. Impact of warmer weather on electricity sector emissions due to building energy use [J]. Environmental Research Letters, 2017,12(6):064014.

[20] Chen X, Yang L. Temperature and industrial output: Firm-level evidence from China [J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2019,95(C):257-274.

[21] Wu J, Liao H. Weather, travel mode choice, and impacts on subway ridership in Beijing [J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2020,135(2):264-279.

[22] Cai B, Cui C, Zhang D, et al. China city-level greenhouse gas emissions inventory in 2015and uncertainty analysis [J]. Applied Energy, 2019,253(C):113579.

[23] Hu C, Griffis T, Xia L, et al. Anthropogenic CO_2 emission reduction during the COVID-19pandemic in Nanchang City, China [J]. Environmental Pollution, 2022,309(24):119767.

[24] Hu C, Liu C, Hu N, et al. Government environmental control measures on CO_2 emission during the 2014 Youth Olympic Games in Nanjing: Perspectives from a top-down approach [J]. Journal of Environmental Sciences, 2022,113:165-178.

[25] Zhang J, Ji D, Hu C, et al. Multiple-model based simulation of urban atmospheric methane concentration and the attributions to its seasonal variations: A case study in Hangzhou megacity, China [J]. Environmental Pollution, 2024,361(15):124781.

[26] 胡　诚,刘寿东,曹　畅,等.南京市大气 CO_2 浓度模拟及源贡献研究 [J]. 环境科学学报, 2017,37(10):38623875.
Hu C, Liu S, Cao C, et al. Simulation of atmospheric CO_2 concentration and source apportionment analysis in Nanjing City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017,37(10):3862-3875.

[27] 陈珑珑,肖　薇,杨　帆,等.基于上海高层建筑观测冬季大气 CO_2/CH_4 垂直变化 [J]. 中国环境科学, 2024,44(8):4155-4166.
Chen L, Xiao W, Yang F, et al. Vertical variations of CO_2/CH_4 in winter based on observations at high-rise buildings in Shanghai [J]. China Environmental Science, 2024,44(8):4155-4166.

[28] Jiang Z, Li J, Lu X, et al. Impact of western Pacific subtropical high on ozone pollution over eastern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2021,21(4):2601-2613.

[29] 杭州市人民政府.国家碳达峰试点(杭州)实施方案.2024.https://www.hangzhou.gov.cn/art/2024/5/28/art_1229063381_1843505.html.

[30] 吴晋辉,肖　薇,陈　亮,等.低成本高密度监测网在城市 CO_2 浓度监测中的可行性——以杭州为例 [J/OL]. 中国环境科学, 2025:1-15.
Wu J, Xiao W, Chen L, et al. The feasibility of low-cost high-density monitoring networks for urban CO_2 concentration monitoring: A case study of Hangzhou [J]. China Environmental Science, 2025:1-15.

[31] Hu C, Xiao W, Timothy J, et al. Estimation of anthropogenic CH_4 and CO_2 emissions in Taiyuan-Jinzhong Region: One of the world's largest emission hotspots [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2023,128,e2022JD037915.

[32] Lin J, Gerbig C, Wofsy S, et al. A near-field tool for simulating the upstream influence of atmospheric observations: The Stochastic Time-Inverted Lagrangian Transport (STILT) model [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003,108(D16):4493.

[33] Huang W, Griffis T, Hu C, et al. Seasonal variations of CH_4 emissions in the Yangtze River Delta region of China are driven by agricultural activities [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021,38(9):1537-1551.

[34] 黄　卓,陈　辉,田　华.高温热浪指标研究 [J]. 气象, 2011,37(3):345-351.
Huang Z, Chen H, Tian H. 2011, Research on high temperature and heat wave indicators [J]. Meteorology, 2011,37(3):345-351.

[35] 孙　博,王会军,黄艳艳,等.2022 年夏季中国高温干旱气候特征及成因探讨 [J]. 大气科学学报, 2023,46(1):1-8.
Sun B, Wang H, Huang Y, et al. Characteristics and causes of the hot-dry climate anomalies in China during summer of 2022 [J]. Trans Atmos Sci, 2023,46(1):1-8.

[36] Rode A, Carleton T, Delgado M, et al. Estimating a social cost of carbon for global energy consumption [J]. Nature, 2021,598(7880):308-314.

[37] CEC Statistics and Data Centre. (2022). Electricity Consumption January - August 2022. China Electricity Council.

[38] Zhang P, Deschenes O, Meng K, et al. Temperature effects on productivity and factor reallocation: evidence from a half million Chinese manufacturing plants [J]. Ewing Marion Kauffman Foundation Research Paper Series, 2018,88(C):1-17.

[39] Coffel E, Mankin J. Thermal power generation is disadvantaged in a warming world [J]. Environmental Research Letters, 2021,16(2):024043.

[40] 国家统计局.中国统计年鉴 2022 [M]. 北京:中国统计出版社, 2022.

[41] Wang S, Huang Y, Zhou Y. Spatial spillover effect and driving forces of carbon emission intensity at the city level in China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019,29(2):231-252.

[42] Wang Y, Lu B, Han Z. Rapid increase of the nighttime electricity demand in Beijing due to compound heatwaves [J]. Urban Climate, 2023,50:101595.

[43] Zeighami A, Kern J, Yates A, et al. West Coast droughts and heat waves exacerbate pollution inequality and can evade emission control policies [J]. Nature Communications, 2023,14(1):1415.

[44] Zhao W, Zhu B, Davis S, et al. Reliance on fossil fuels increases during extreme temperature events in the continental United States [J]. Communications Earth & Environment, 2023,4(1):1-11.

[45] Sun W, Liu Y, Li M, et al. Study on heat flow transfer characteristics and main influencing factors of waxy crude oil tank during storage heating process under dynamic thermal conditions [J]. Energy, 2023, 269(C):127001.

[46] 中华人民共和国交通运输部.2022 年 8 月公路旅客运输量 [Z]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202209/t20220928_3686889.html.

作者简介：杨钟昊(2001-),男,新疆乌鲁木齐人,南京信息工程大学硕士研究生,研究方向为城市温室气体观测与反演.2421956278@qq.com.