



长三角地区典型城区冬季CO₂和CH₄排放观测研究

王凯¹, 张雨婷^{1,2}, 郑循华^{1,2}, 林廷容³



1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室

2 中国科学院大学地球与行星科学学院 3 宁波诺丁汉大学理工学院电气与电子工程系

背景

- 二氧化碳 (CO₂) 和甲烷 (CH₄) 是最重要的两种温室气体, 对全球变暖贡献的总和超过80%;
- 城市占地球陆地面积的3%, 却直接和间接造成了44%和70%的全球人为碳排放, 是最重要的温室气体排放源;
- 实时精准监测温室气体排放是国家实施“双碳”战略的紧迫需求;
- 我国城市区域CO₂和CH₄排放通量直接观测研究极为缺乏。

研究目标

- 揭示长三角地区典型城市下垫面冬季CO₂和CH₄排放变化特征与规律及其主控因素, 为校验城市温室气体排放的其它计量方法提供客观的动态通量数据;
- 量化长三角典型城区冬季CO₂和CH₄净排放量, 为制定城市温室气体减排措施和对策提供科学依据。

研究方法

研究区域

- 观测地点: 浙江省宁波市中心城区的一座电视信号塔 (121°33'46" E, 29°50'20" N)
- 城市下垫面: 建筑物34%, 道路与不透水地面31%, 植被26%, 水面7%, 其它2%;

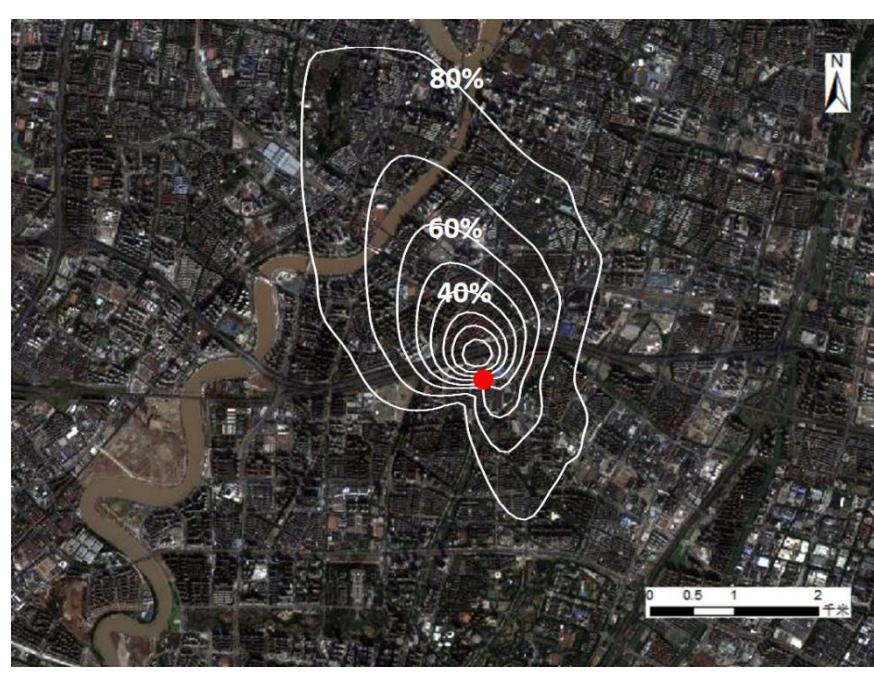
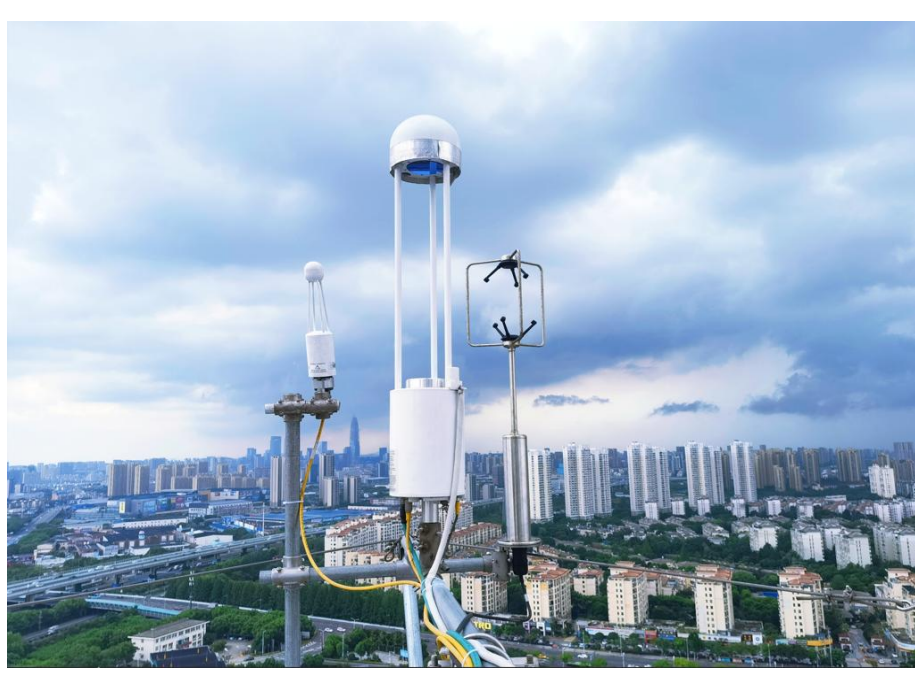
观测方法: 涡动相关法

观测高度: 距地面100米

观测仪器

- 三维超声风温仪 (WindmasterPro, Gill)
- 开路CO₂/H₂O分析仪 (LI-7500DS, LI-COR)
- 开路CH₄分析仪 (LI-7700, LI-COR)
- 自动气象站 (ATMOS41, METER)

观测时间: 2022年12月01– 2023年2月28日



观测点下垫面分布类型 (左图)、观测仪器 (中图) 和通量足迹分析 (右图)

通量计算

- EddyPro软件, 由10 Hz原始观测数据计算30分钟平均通量
- 数据处理步骤: 异常值剔除、坐标旋转、超声温度修正、风速和浓度信号延迟校正、频谱修正、WPL修正

通量质量控制

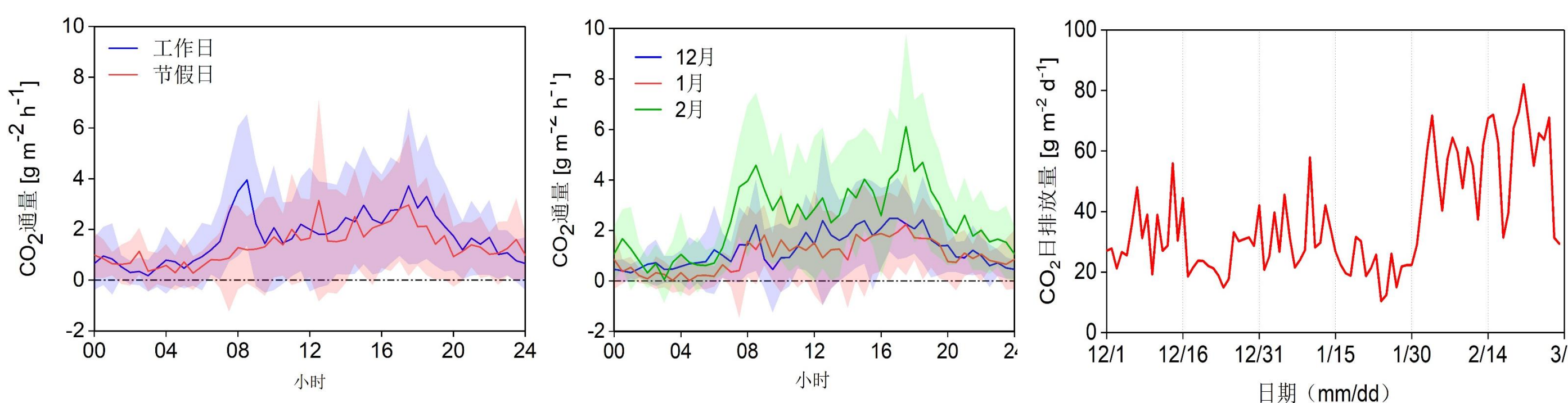
- 删除开路气体分析仪信号值偏低的半小时通量 (LI-7500DS < 60%, LI-7700 < 10%)
- 删除气流受观测平台干扰时段的半小时通量
- 删除湍流平稳性检验和湍流发展充分性检验质量标记为2的通量
- 删除夜间摩擦风速小于0.15 m s⁻¹的通量
- 删除与滑动平均值偏差大于3倍标准差的通量

缺失通量插补

- 回归神经网络 (RNN)
- 输入参数: 时间、节假日标记、风向、气温、太阳辐射、风速、相对湿度

结果1: CO₂ 排放特征

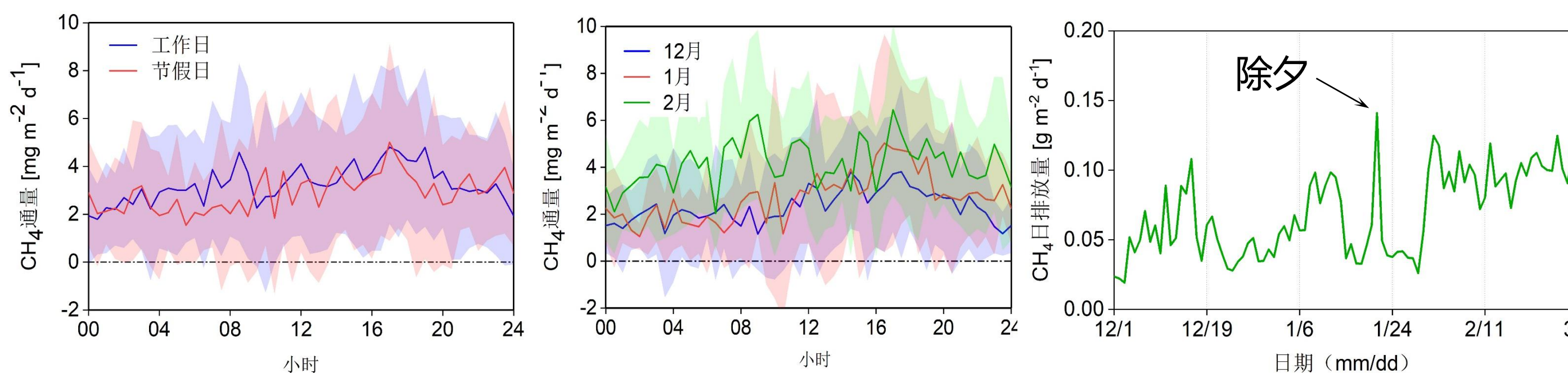
- 明显的日变化与周变化特征
 - 工作日呈双峰型, 早高峰 (8:30前后) 和晚高峰 (17:30前后)
 - 节假日呈单峰型, 早高峰缺失, 晚高峰提前
 - 工作日排放显著大于节假日
- 冬季CO₂日排放量: 10.4–82.0 g m⁻² d⁻¹ (平均14.1 g m⁻² d⁻¹)
- 2月排放显著大于12月与1月, 与疫情后人们出行活动增加有关
- 东北方向通量显著大于其他方向 (交通排放影响)
- 主要排放源: 燃油机动车和民用天然气燃烧



CO₂通量的日变化趋势 (左图、中图) 和CO₂日排放量 (右图)

结果2: CH₄ 排放特征

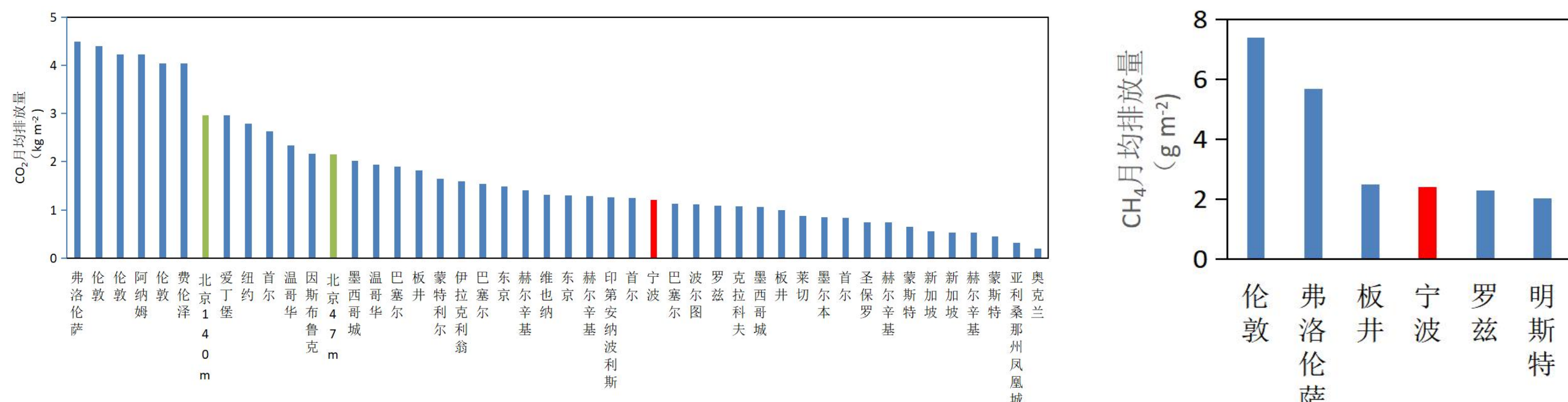
- 日变化及周变化特征与CO₂相似, 但变化幅度更小
- CH₄日排放量: 0.019–0.141 g m⁻² d⁻¹ (平均0.07 g m⁻² d⁻¹)
- 2月排放显著大于12月与1月, 最大日排放量出现在除夕
- CH₄排放主要来自城市天然气管网泄露和居民烹饪过程中的泄漏, 排放通量与居民天然气用量呈显著正相关
- CH₄通量的空间分析表明, 污染的城市河流是不可忽视的CH₄排放源



CH₄通量的日变化趋势 (左图、中图) 和CH₄日排放量 (右图)

结果3: 国内外城市冬季CO₂和CH₄排放量比较

- 宁波城区冬季CO₂和CH₄月排放量分别为1.2 kg m⁻²和 2.1 g m⁻²
- 与国内外同类观测研究相比, CO₂和CH₄排放均处于中等偏下水平
- 不同城市CO₂和CH₄排放量差异的原因: 人口密度、土地利用方式、生活方式 (如取暖方式) 等不同。



全球城市冬季 CO₂和CH₄月均排放量比较 (基于涡动相关法直接测量)

结论与展望

- 冬季宁波城区是CO₂和CH₄的强排放源, 日排放量分别为14.1 g m⁻² d⁻¹和 0.07 g m⁻² d⁻¹, 此排放量在国内外城市中处于中等偏下水平;
- CO₂排放主要受道路机动车流量影响, CH₄最主要排放来自城市天然气管网泄漏, 春节和疫情结束后人类活动增加显著促进两者排放;
- 基于涡动相关法的CO₂和CH₄通量长期连续观测可为城市温室气体减排成效评估提供直接证据。