



当前现实面临的几个空气质量预测 困难及其研究问题

长三角大气环境管理的学术交流会
上海生态环境局 亚洲清洁空气中心
上海, 2025年8月27-28日



致谢：感谢上海环境局和长三角省市领导专家指导支持



报告思路

(讨论归纳：钟流举教授，2025)

我国空气质量预测预报业务体系功能

业务/技术体系应用现行主流技术

两大主要功用

服务社会公众

支撑管理决策

面临的主要挑战

近十年我国空气质量显著改善，问题焦点和难点从PM2.5演变为O3

管理决策和污染治理对预测提出了更高的要求

关注的重要研究问题

分离预测同期温度升高对臭氧增加的贡献问题

分离预测生物源与人为源VOCs对城市臭氧量化贡献的问题

分离预测长距离传输沙尘暴对华东华中西南华南PM2.5影响的问题

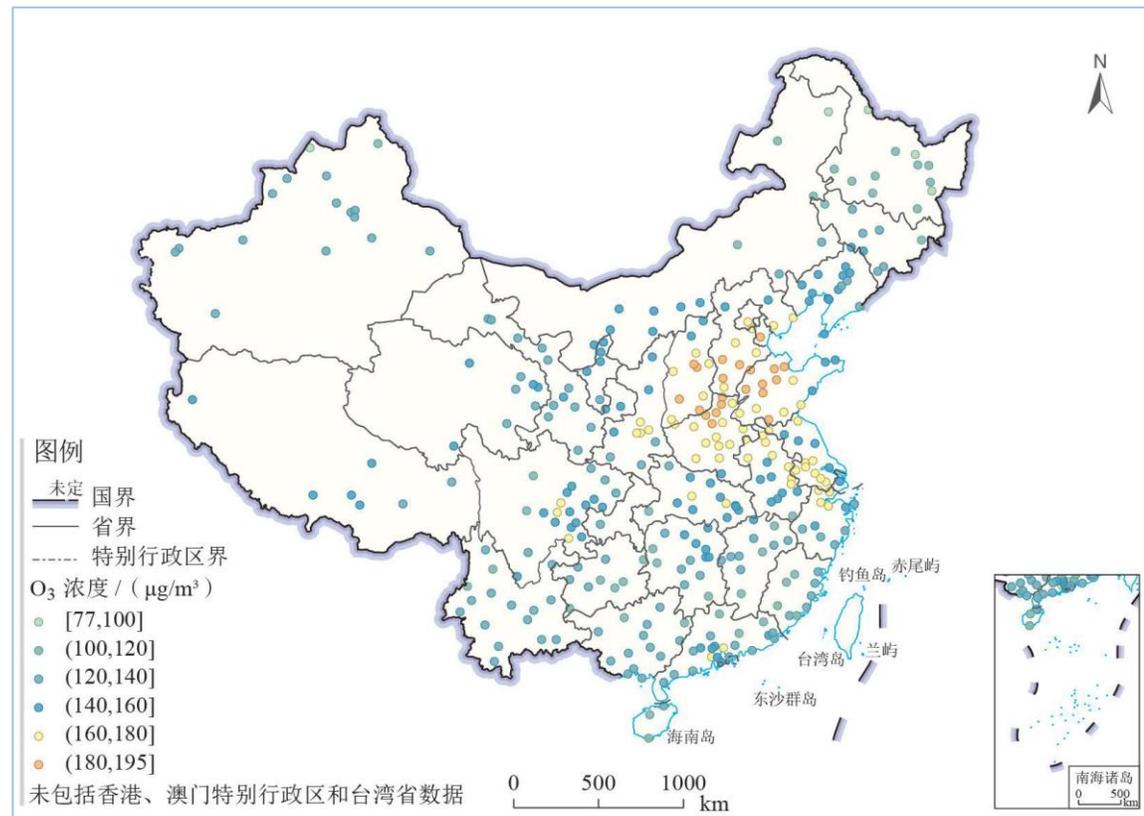
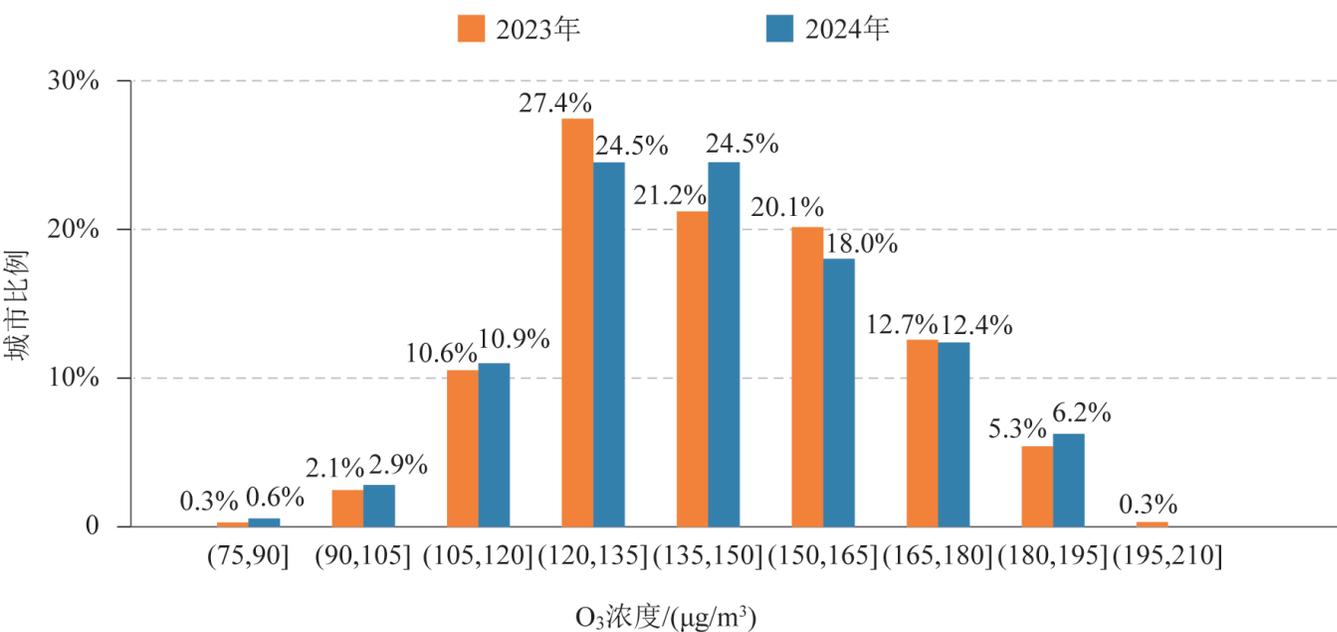


01

分离量化预测同期气候变暖对城市臭氧生成增加影响的问题

问题的背景 - 臭氧超标比例成为空气质量优良率主要因素

2024年， O_3 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 为首要污染物的超标天数，分别占总超标天数的**45.3%**、**39.1%**、**15.7%**。

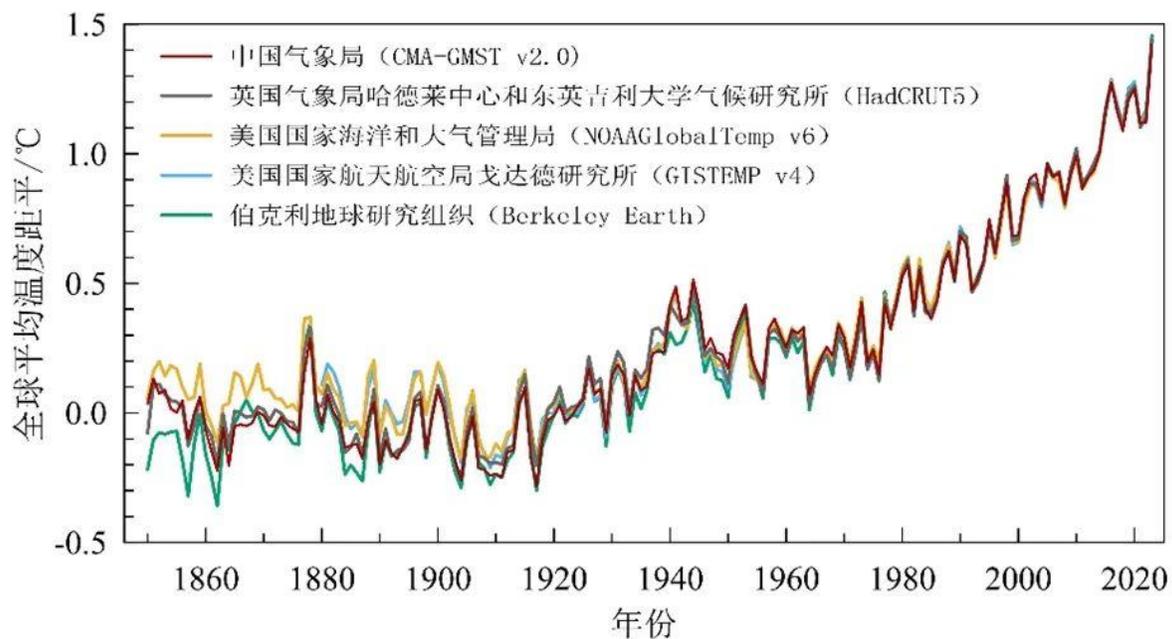


2024年全国城市环境空气质量 O_3 浓度区间分布及年际变化
(臭氧日最大8小时平均值第90百分位数浓度，右图同)

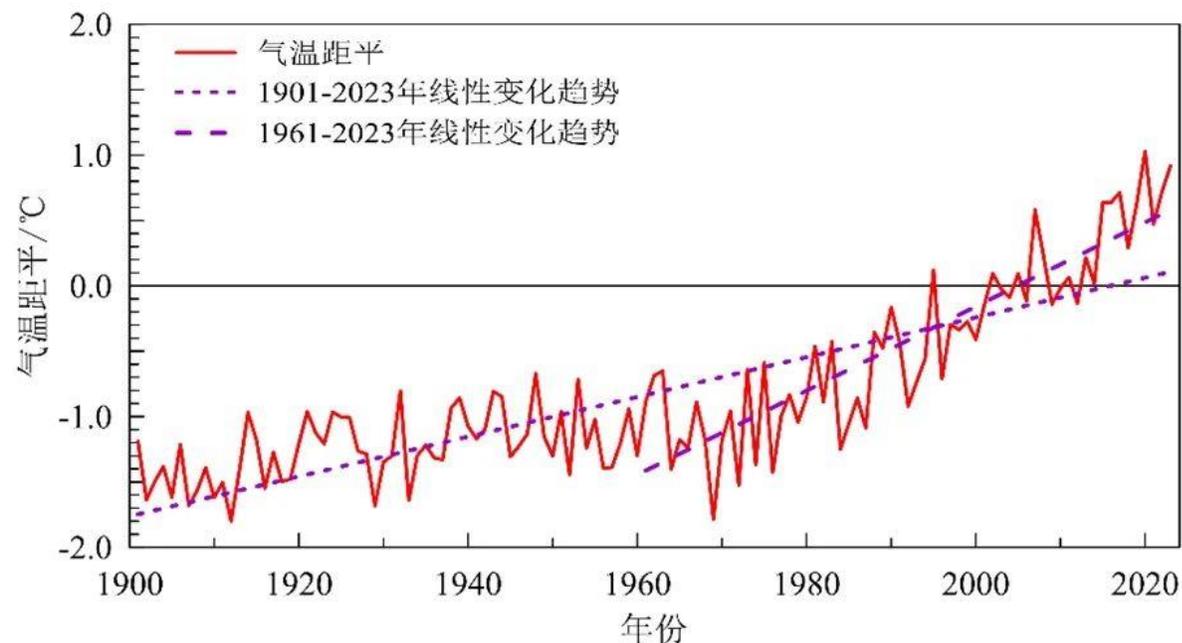
2024年全国城市环境空气质量 O_3 浓度区间分布示意图

(来源：《2024中国生态环境状况公报》；网络公开资料；2020-2025)

问题的背景 - 同期全球和亚洲气温持续升高趋势明显



1850~2023年全球平均温度距平（相对于1850~1900年平均值）



1901~2023年亚洲陆地表面年平均气温距平（相对于1991~2020年平均值）

问题的背景 - 同期中国气温持续升高趋势明显

历年全国平均气温变化

统计时间：1961-2024年

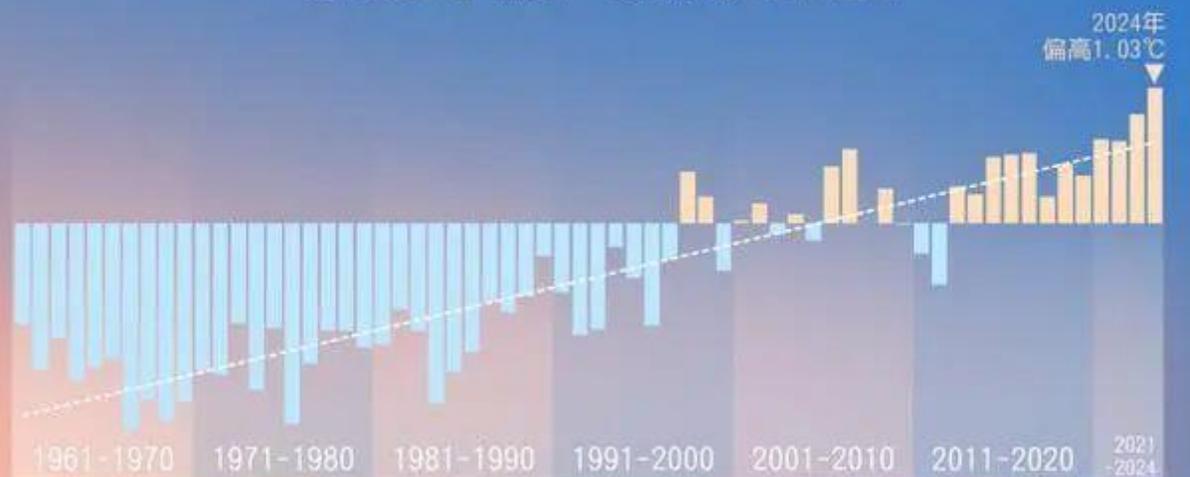
中国天气



近年气温多偏高

逐年全国平均气温距平 统计时间：1961-2024年

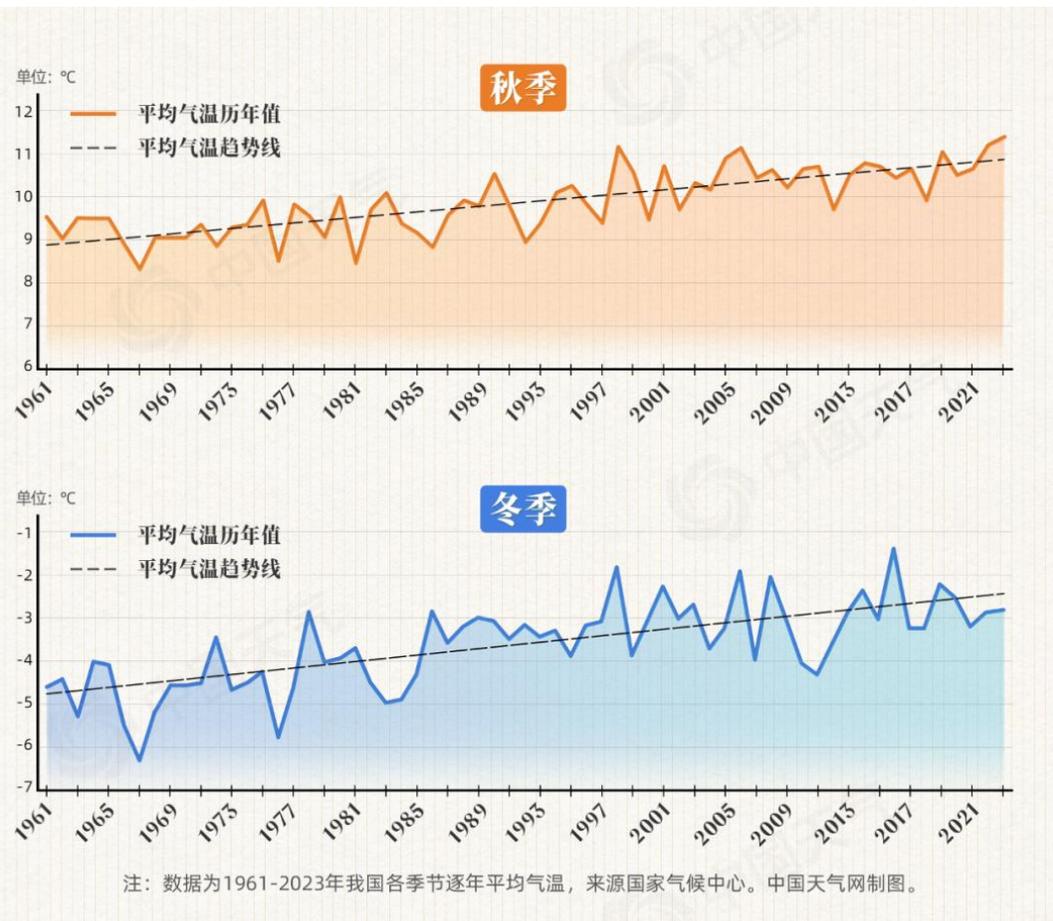
中国天气



问题的背景 - 同期中国四季气温持续升高趋势明显



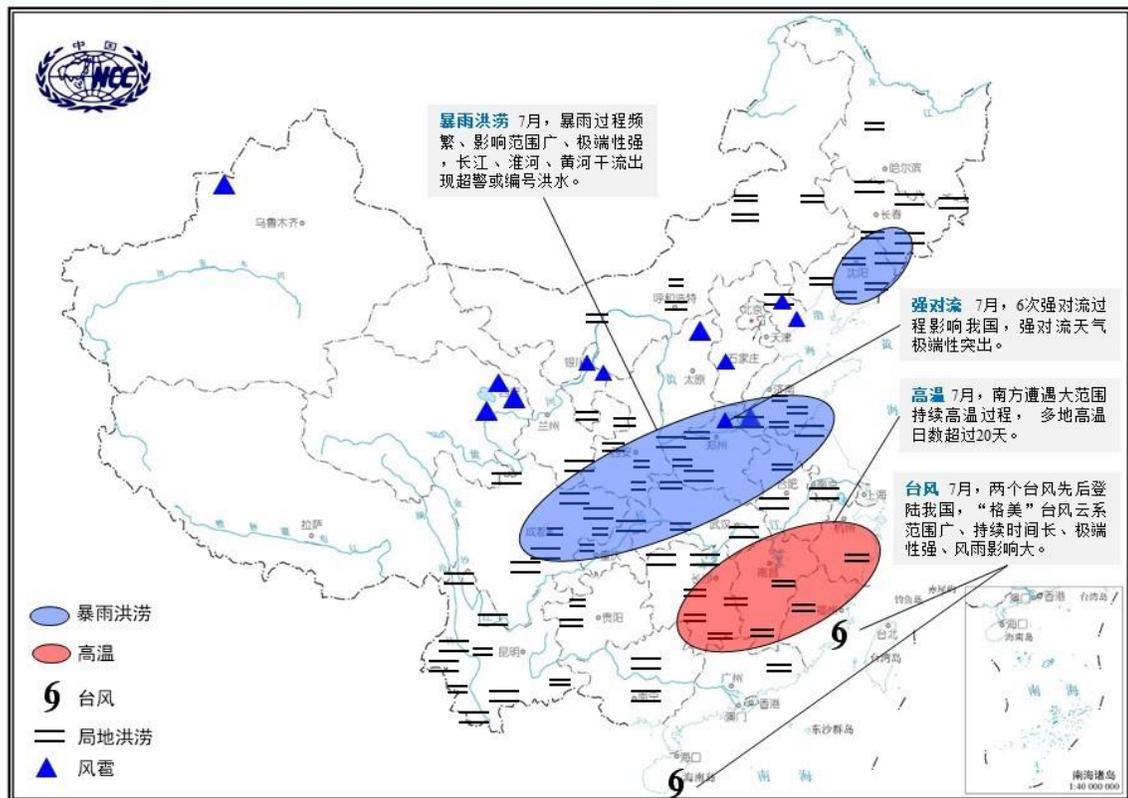
2024中国气候变化蓝皮书发布:
未来30年平均高温天数将增加7~15天。



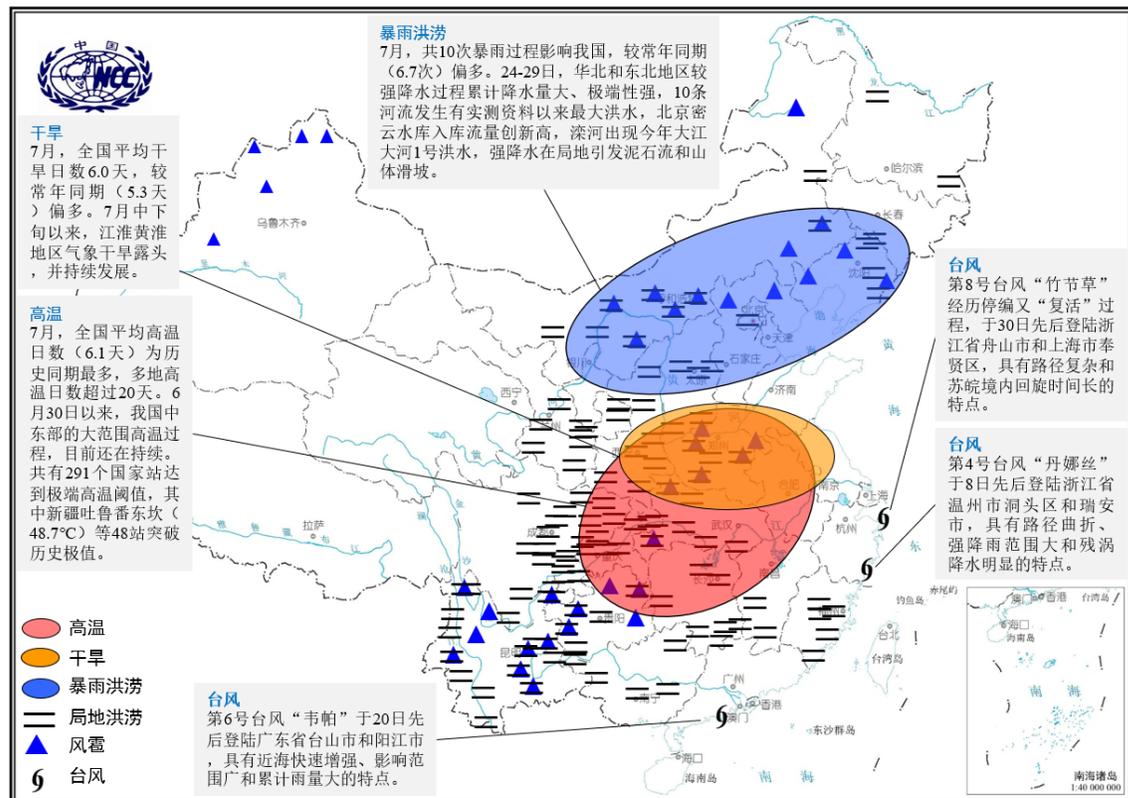
(来源: 《中国气候变化蓝皮书》(2024); 国家气候中心、中国天气网等网络公开资料; 2020-2025)

问题的背景 - 今年夏季中东部高温影响持续并明显增强

2024年7月全国主要气象灾害分布图

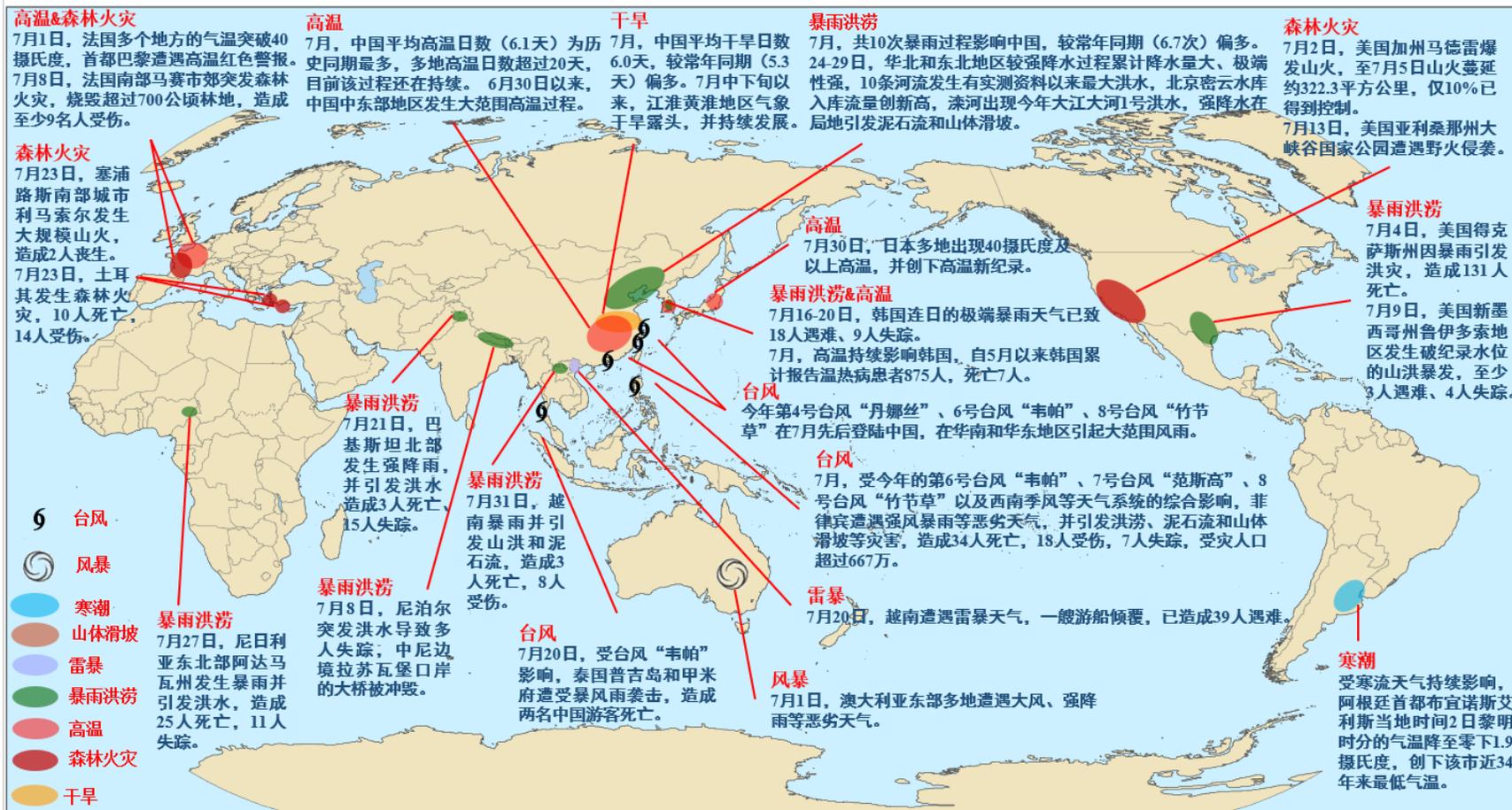


2025年7月全国主要气象灾害分布图



问题的背景 - 今年7月东亚和其他区域高温超历史记录

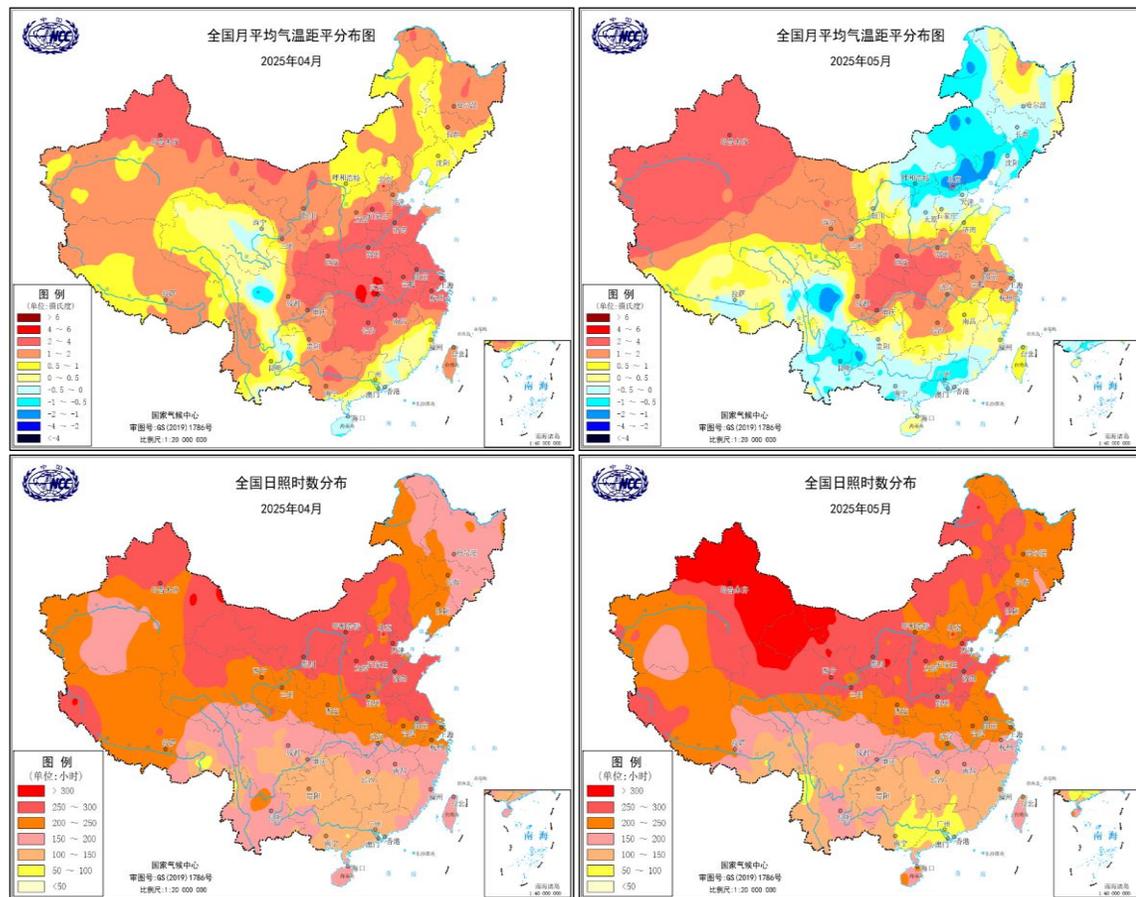
2025年7月全球重大灾害性天气气候事件示意图



审图号：GS（2019）1786号

（来源：国家气候中心；网络公开资料；2023-2025）

现实需求与困难 - 以江苏精细化空气质量管理为例



异常气象条件是污染加剧的重要诱因。

今年2025年4月，江苏省受高温少雨等极端异常气象条件影响，大气扩散条件差，臭氧和颗粒物等污染物更容易累积，污染显著增加。

4月江苏省平均气温达18.2°C，同比偏高1.1°C，是1961年以来历史最高值。

4月出现25°C以上高温日达11天（去年同期仅4天），而降水量仅为14.3毫米，同比减少超七成。

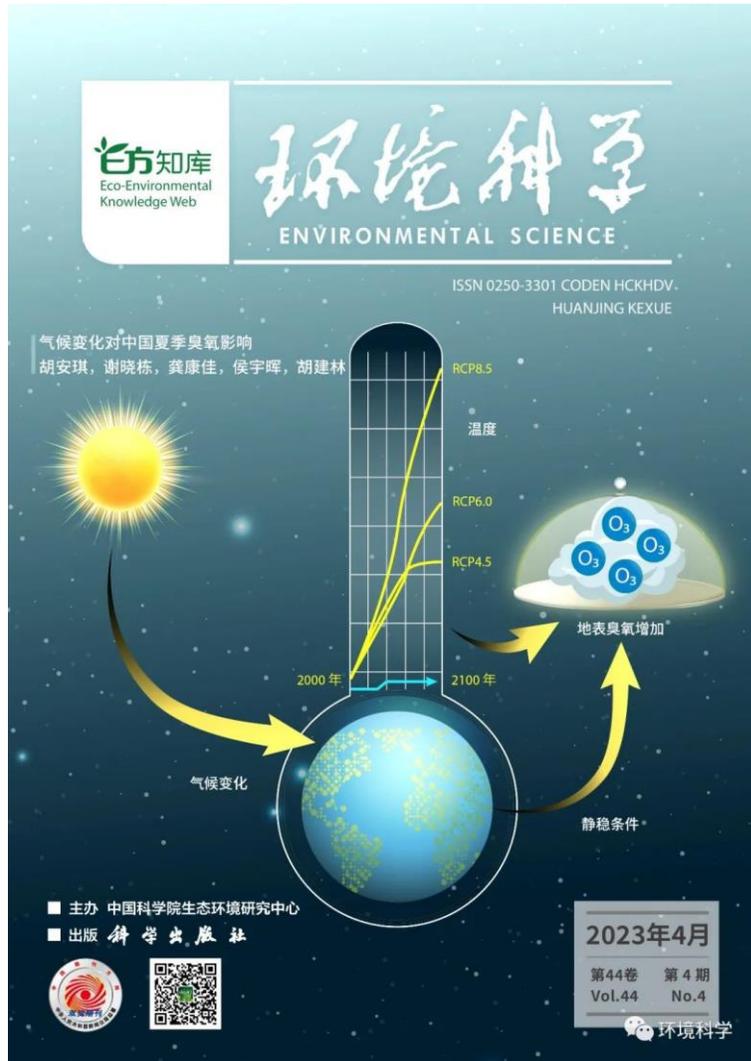
为进一步压降污染源排放，抵消极端异常气象条件的不利影响，

从4月底开始，江苏省生态环境厅成立臭氧污染攻坚专班，通过每日形势分析、走航监测溯源、企业VOCs排放管控等措施，推进污染削峰。

压降污染源排放量化统筹？

是否考虑逐年高温的增量？

研究问题的探索 - 温度升高对臭氧增加贡献前期研究举例



基于CMIP5提供的CESM模式的预测结果, 为WRF模式提供初始边界条件, 降尺度模拟了2006~2015和不同RCP (representative concentration pathway) 情景下2046~2055年的气象条件。

进一步用得到的气象数据, 驱动区域空气质量模型CMAQ, 分析不同气候情景下O₃浓度的变化。

结果表明, 气候变化导致中国夏季边界层高度、温度均值和高温天数增加, 相对湿度有所降低, 近地面风速无明显变化。

气候变暖背景下高温日数的增加导致O₃极端污染事件增加, 未来中国夏季可能会发生更多长持续时间的O₃连续超标事件, 其中RCP8.5 (温室气体浓度高) 情景最严重, RCP4.5 (温室气体浓度中低) 情景次之。

研究问题的探索 - 温度升高对臭氧增加贡献前期研究举例

Environmental Science and Ecotechnology 24 (2025) 100524



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Environmental Science and Ecotechnology

journal homepage: www.journals.elsevier.com/environmental-science-and-ecotechnology/



Original Research

Causal-inference machine learning reveals the drivers of China's 2022 ozone rebound

Lin Wang^{a,1}, Baihua Chen^{a,1}, Jingyi Ouyang^{a,b}, Yanshu Mu^c, Ling Zhen^{a,b}, Lin Yang^a, Wei Xu^{a,**}, Lina Tang^{a,*}

^a Key Laboratory of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen, 361021, China

^b University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

^c China School of Mathematics, Jilin University, Changchun, 130012, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 May 2024

Received in revised form

4 January 2025

Accepted 5 January 2025

Keywords:

Ground-level ozone

Interpretable machine learning

Causal forest

Ozone rebound

ABSTRACT

Ground-level ozone concentrations rebounded significantly across China in 2022, challenging air quality management and public health. Identifying the drivers of this rebound is crucial for designing effective mitigation strategies. Commonly used methods, such as chemical transport models and machine learning, provide valuable insights but face limitations—chemical transport models are computationally intensive, while machine learning often fails to address confounding factors or establish causality. Here we show that elevated temperatures and increased solar radiation, as primary meteorological drivers, collectively account for 57% of the total ozone increase, based on an integrated analysis of ground-based monitoring data, satellite observations, and meteorological reanalysis information using explainable machine learning and causal inference techniques. Compared to the year 2021, 90% of the stations reported an increase in the Formaldehyde to Nitrogen ratio, implying a growing sensitivity of ozone formation to nitrogen oxide levels. These findings highlight the significant causal role of meteorological changes in the ozone rebound, urging the adoption of targeted ozone mitigation strategies under climate warming, particularly through varied regional strategies that consider existing anthropogenic emission levels and the prospective increase in biogenic volatile organic compounds. This identification of causal relationships in air pollution dynamics can support data-driven and accurate decision-making.

© 2025 The Authors. Published by Elsevier B.V. on behalf of Chinese Society for Environmental Sciences, Harbin Institute of Technology, Chinese Research Academy of Environmental Sciences. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

因果推理机器学习研究，通过随机森林建模、SHAP 分析和因果森林建模，揭示了 2022 年中国范围内臭氧反弹的主要驱动因素。

因果推断分析表明，气象变化在臭氧浓度上升中起到关键作用，其中气温升高贡献了 38.90%，太阳辐射增强贡献了 18.47%。

气温在长三角 (YRD)、京津冀 (BTH) 及四川盆地 (SCB) 等地区从夏季至秋季显著提升了臭氧浓度，而太阳辐射在各区域和季节均明显增加了臭氧水平。

这些气象变化加速了臭氧生成所需的光化学反应，突出了臭氧对气象条件变化的敏感性。

2022 年臭氧生成机制的变化表明，**四川盆地及中国中部、东部和南部地区对 NO₂ 的敏感性增强，而这些区域未来因气候变化可能会出现生物源挥发性有机化合物 (BVOCs) 排放的增加。**因此，需要持续减少 NO_x 排放以有效控制臭氧浓度。

呼吁制定适应性污染控制措施，针对不同区域的环境和气候条件实施精准治理，为应对气候变化提供因果科学依据并推动空气质量政策优化。

研究问题的探索 - 温度升高对臭氧增加贡献最近研究举例

nature cities

Explore content ▾ About the journal ▾ Publish with us ▾

nature > nature cities > articles > article

Article | [Open access](#) | Published: 15 August 2025

Urban meteorology–chemistry coupling in compound heat–ozone extremes

[Xueyu Zhou](#), [Mengmeng Li](#), [Xin Huang](#) ✉, [Tengyu Liu](#), [Haoran Zhang](#), [Ximeng Qi](#), [Zilin Wang](#), [Yue Qin](#), [Guannan Geng](#), [Jiaping Wang](#), [Xuguang Chi](#) & [Aijun Ding](#)

[Nature Cities](#) (2025) | [Cite this article](#)

2136 Accesses | 18 Altmetric | [Metrics](#)

Abstract

Heatwaves and ozone (O₃) pollution threaten human and ecosystem health, with their compounding effects particularly severe in cities. While ground-based observations are indicative of urban O₃ pollution during heatwaves, limited vertical insights into the intensified and prolonged O₃ pollution hinder a comprehensive understanding of the underlying mechanisms and mitigation strategies. Here, leveraging airship vertical measurements and meteorology–chemistry coupled modeling, we reveal that heatwave-reinforced turbulence redistributes precursors vertically, altering photochemical stratification and accelerating O₃ production both at the surface and aloft over megacities in China. Stringent emission controls targeting nitrogen oxides could mitigate the heatwave-exacerbated O₃ extremes by narrowing the vertical disparity of photochemical sensitivity. Although heatwaves are projected to intensify, emission reductions due to China’s carbon neutrality pledge could alleviate urban O₃ pollution by 41–47% during heatwaves and help tackle the dual challenges of air pollution and global warming while enhancing the climate resilience of city clusters.

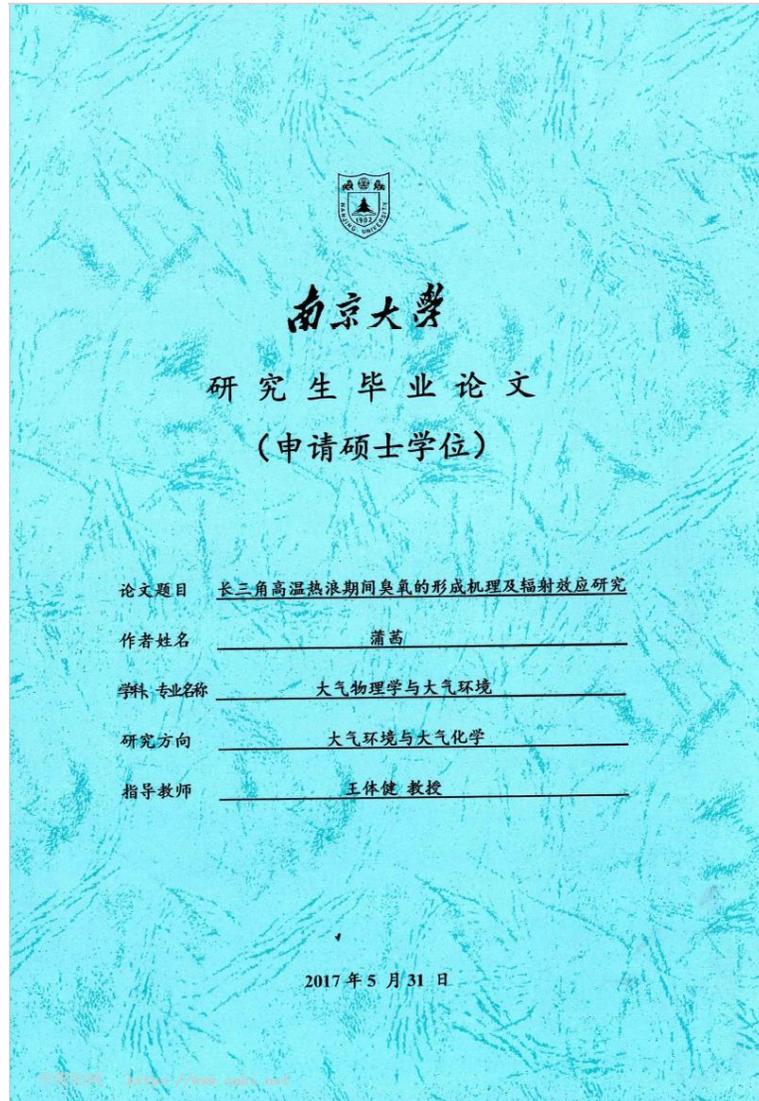
气候变化背景下高温热浪频发，不仅对生态系统和农业生产造成负面影响，也导致严重的臭氧（O₃）污染并威胁人群健康。在人口密集的城市群区，高温-臭氧复合极端事件已成为制约城市宜居性和可持续发展的重要挑战之一。

热浪期间持续的大范围臭氧污染的形成与大气复杂理化结构密切相关，此类高影响天气事件的防控和应对需从**大气理化过程耦合视角系统认识高温-臭氧复合极端事件的形成机制**。

该研究综合卫星遥感、地面空气质量监测等资料，发现**我国过去十年高温期间臭氧浓度普遍增加，臭氧超标站点占比从11.5%攀升至26.6%，暖季高温-臭氧复合极端事件已超过4.2天/年，在我国人口密集的城市群区尤为显著**。

热浪期间的高温和较强的边界层扩散引发臭氧主要前体物浓度呈现异常的垂直结构，氮氧化物（NO_x）在高空增加而近地面明显下降，同时，近地面挥发性有机物（VOCs）浓度也相较平时更高。

研究问题的探索 - 温度升高对城市臭氧增加前期研究举例



研究内容包括以上海、南京、杭州和合肥为代表的长三角地区典型城市夏季近地面臭氧和温度的变化特征分析，**基于区域气候化学模式RegCM-CHEM4 探究高温期间高臭氧的主要影响过程和敏感性因子**，对模式中辐射模块中臭氧的处理进行改进，分析对流层中下层臭氧增加带来的气候效应，

~~~

通过对 **2013-2016年长三角夏季典型城市**近地面氧观测资料的分析发现：

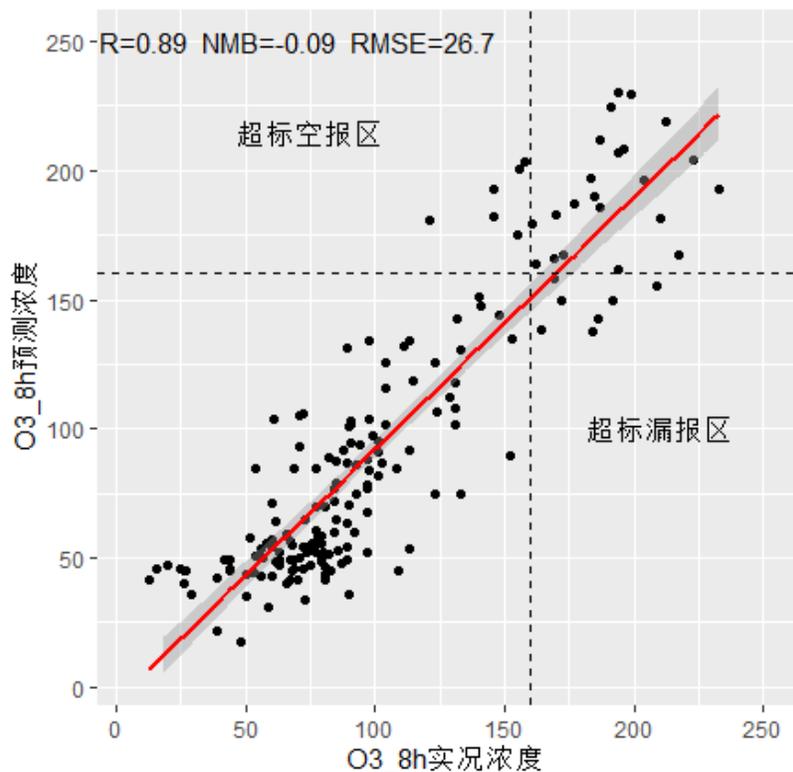
臭氧的日变化呈单峰型特征，峰值出现在当地时间下午三点，长三角地区夏季臭氧的平均浓度为 $31.7 \pm 20.3$  ppb，略高于北半球臭氧背景浓度，且**臭氧有逐年增长的趋势**，**上海、南京、杭州和合肥的增长率分别为 $+0.06$ ppb/yr、 $+2.31$ ppb/yr、 $+0.25$ ppb/yr和 $+1.58$ ppb/yr。**

2m温度的观测资料表明 2013 和 2016 是显著的高温热浪年，最高气温达  $41^{\circ}\text{C}$ ，异常高温天气在整个夏季所占比重分别为47.3%和 27%。

**臭氧浓度跟温度有很好的正相关关系**，并且在不同的温度时段，臭氧现出不同的增长速率，当温度在 $17-28^{\circ}\text{C}$ 之间，臭氧随温度升高变化平稳，甚至出现轻微的下落现象，这主要跟夜间臭氧的消耗有关；**温度在 $28-38^{\circ}\text{C}$ 之间时，臭氧随温度快速增长，增速可达 $4-5$ ppb/ $^{\circ}\text{C}$** ；温度在  $38^{\circ}\text{C}$ 以上时，臭氧仍然随温度升高浓度增加，但增长速率略有下降。

# 研究问题的探索 - 管理支撑沿用传统有限方法尚未突破

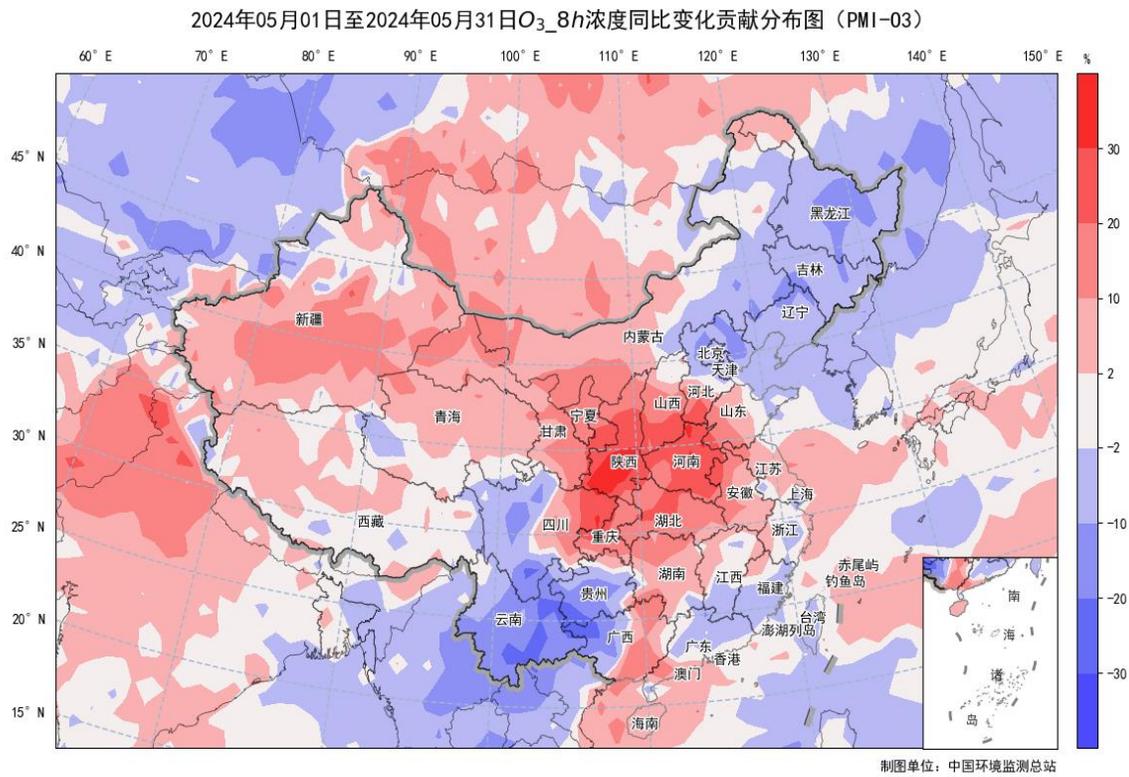
2020年7月，选取北京市作为研究对象，建立**多元回归臭氧预报模型**。对2020年1-6月北京O<sub>3</sub>-8h浓度开展逐日未来24小时预报，超标天的预报命中率达到78%。



2020年1-6月北京O<sub>3</sub>-8h监测值与24h预报值对比

(来源：多元回归应用于臭氧预报-以北京市为例，汪巍刘冰等；同期气象影响评估，王威朱莉莉等；2019-2025)

基于NAQPMS空气质量数值模型，在每日业务化预报基础上，在保持当前排放源不变的条件下，使用去年同期气象场进行情景模拟，进而综合**评估气象条件改变对我国重点区域臭氧浓度变化的影响**。



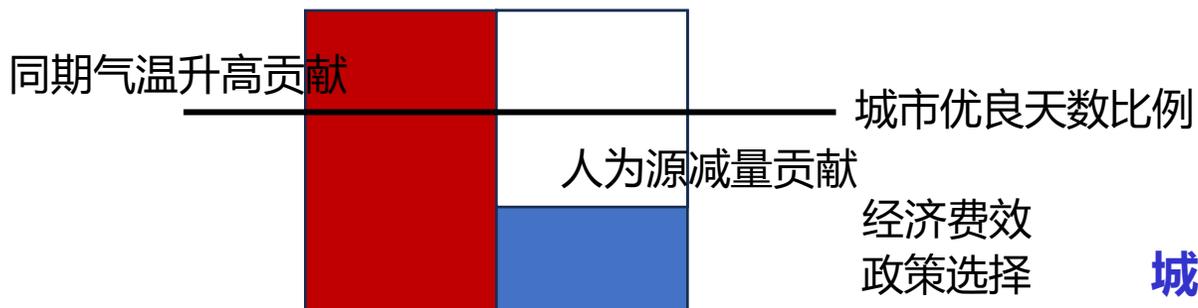
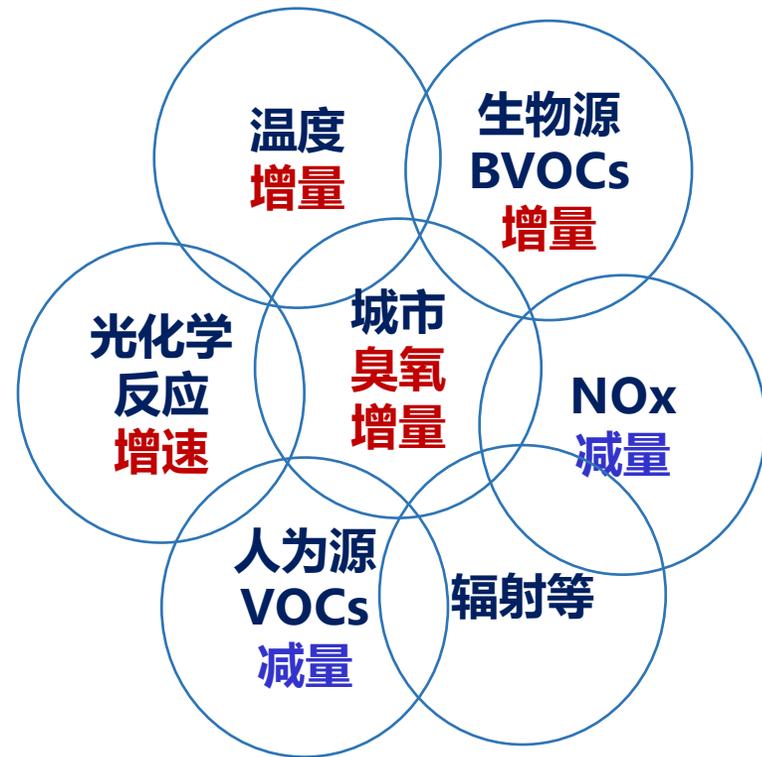
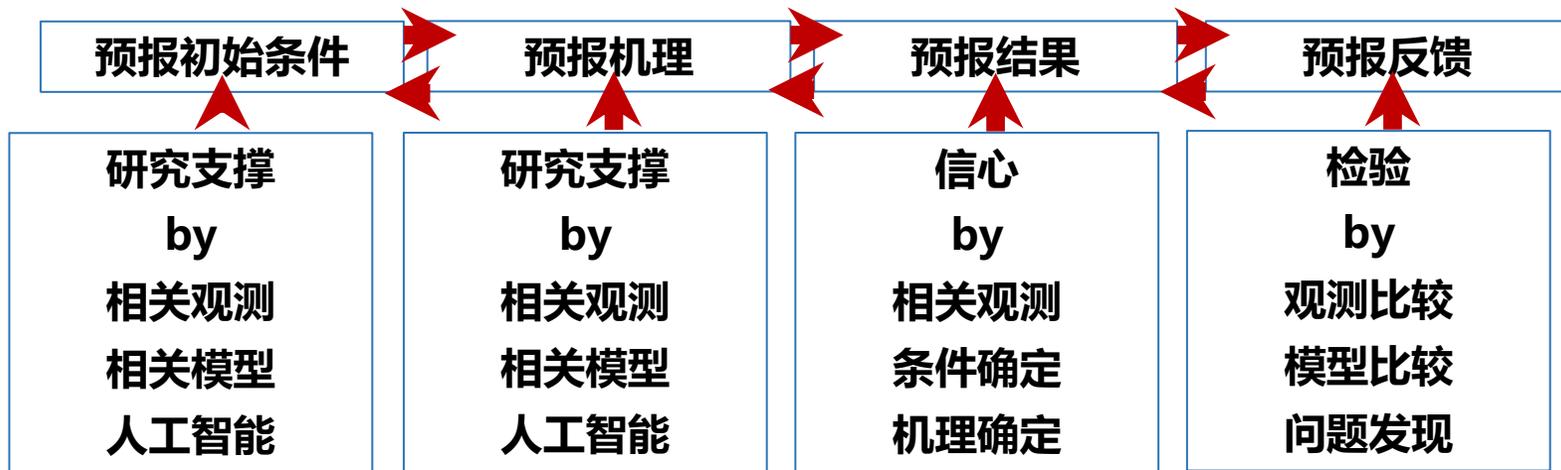
2024年5月气象条件对全国O<sub>3</sub>浓度同比变化贡献评估

# 研究问题的探索 - 前期研究局限在数值统计推测/多数区域尺度

缺乏温度升高对城市尺度臭氧增加的量化研究  
支撑城市精细化管理的需求研究还有短板

# 研究问题的提出 - 分离量化同期升温对臭氧增加的贡献

研究需要推进到支撑精细化管理的**城市尺度臭氧增量量化贡献**



**城市尺度预报支撑的量化 → 臭氧增量城市减排支撑的量化**

“为进一步压降污染源排放，抵消极端异常气象条件的不利影响”（心中有数）

“粤港澳大湾区二次污染与气候变化协同应对的综合防控技术示范与实践”项目



# 02

分离量化预测生物源与人为源VOCs  
对城市臭氧和PM<sub>2.5</sub>贡献的问题

# 问题的背景 - 中国植被覆盖越来越好

权威 行业数据中心

根据查询的数据，最新一年是2023年中国森林覆盖率为 22.96%



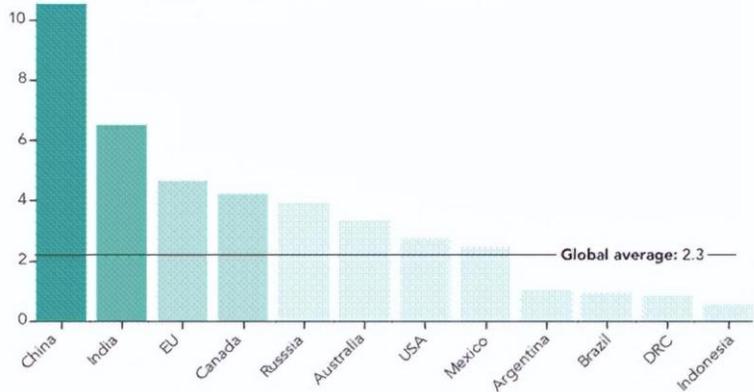
中经数据

中国森林覆盖率较大的主要还是南方为主，在沿海地区更加明显



NASA & Nature: 地球因中国大变，更绿

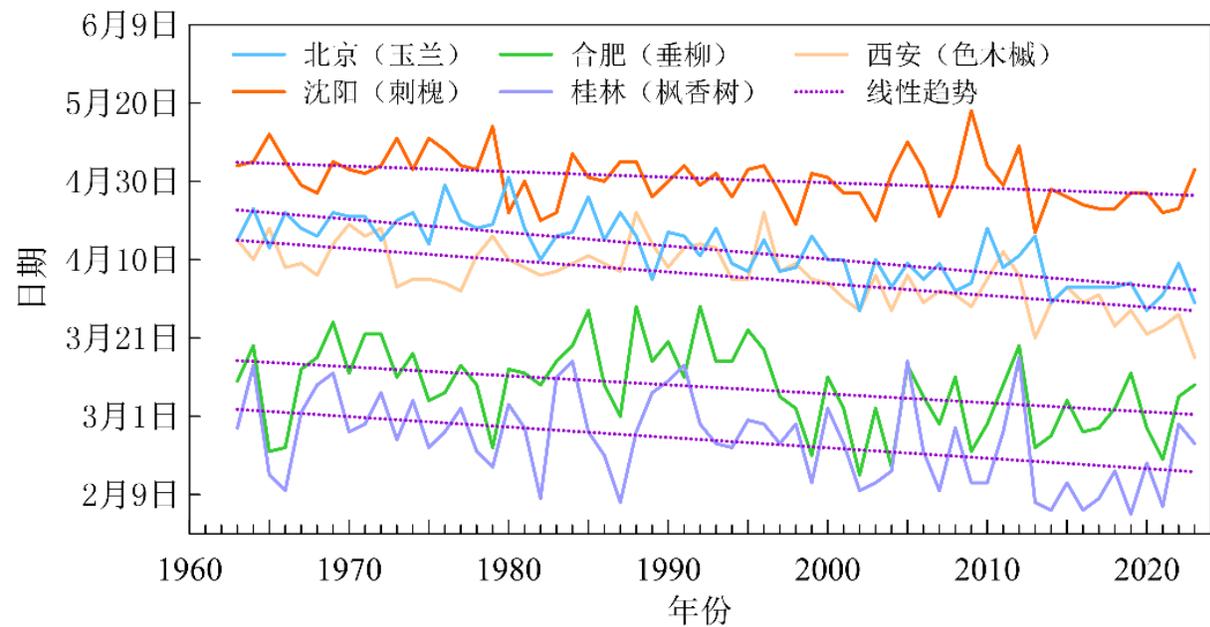
China and India Lead in Greening Due to Human Activity  
Change in Leaf Area (% per decade)



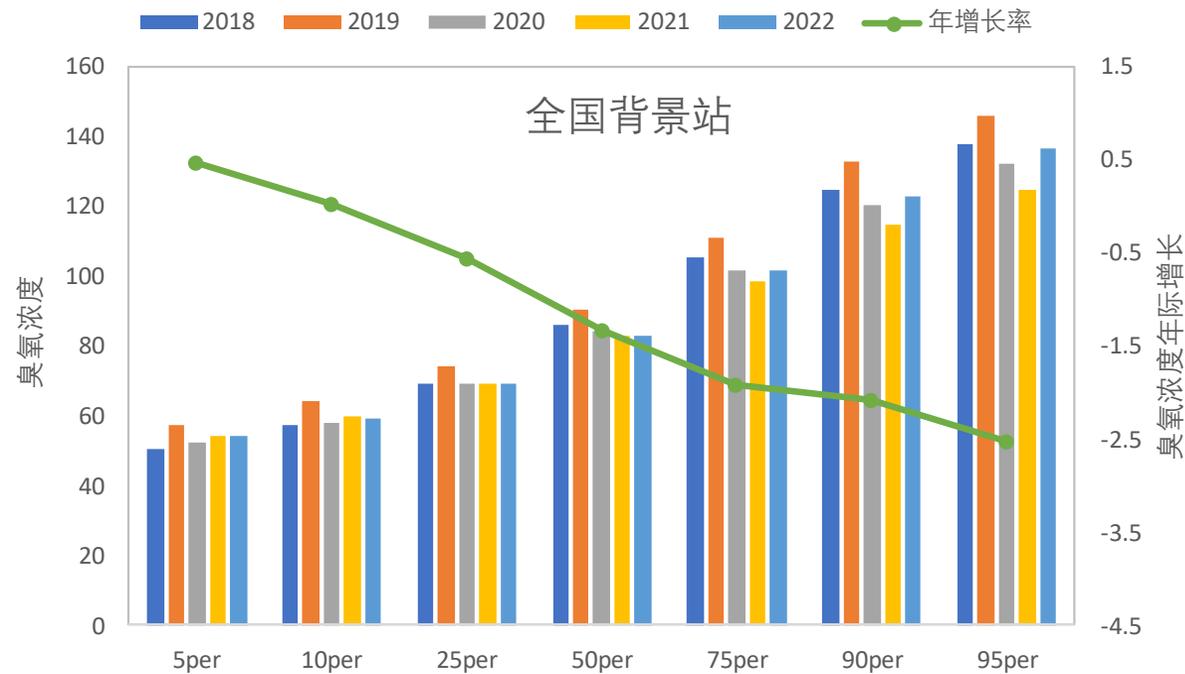
(来源: 中经数据; NASA; NATURE; 网络公开资料; 2019-2025)

# 问题的背景 - 气候变暖情况下植物排放影响越来越显著

## 中国代表性植物春季物候期呈提前趋势



## 历年背景地区臭氧本底浓度逐年上升幅度较小



(来源: 《中国气候变化蓝皮书》(2024); 中国环境监测总站大气室等; 网络公开资料; 2020-2025)

# 研究问题的探索 - 生物源BVOCs对臭氧贡献前期研究举例

> [Environ Sci Technol](#). 2017 Jun 6;51(11):6120-6130. doi: 10.1021/acs.est.6b06514. Epub 2017 May 17.

## Effect of VOC Emissions from Vegetation on Air Quality in Berlin during a Heatwave

Galina Churkina<sup>1,2</sup>, Friderike Kuik<sup>1</sup>, Boris Bonn<sup>1,3</sup>, Axel Lauer<sup>4</sup>, Rüdiger Grote<sup>1,5</sup>, Karolina Tomiak<sup>1</sup>, Tim M Butler<sup>1</sup>

Affiliations + expand

PMID: 28513175 DOI: 10.1021/acs.est.6b06514

[Free article](#)

### Abstract

The potential of emissions from urban vegetation combined with anthropogenic emissions to produce ozone and particulate matter has long been recognized. This potential increases with rising temperatures and may lead to severe problems with air quality in densely populated areas during heat waves. Here, we investigate how heat waves affect emissions of volatile organic compounds from urban/suburban vegetation and corresponding ground-level ozone and particulate matter. We use the Weather Research and Forecasting Model with atmospheric chemistry (WRF-Chem) with emissions of volatile organic compounds (VOCs) from vegetation simulated with MEGAN to quantify some of these feedbacks in Berlin, Germany, during the heat wave in 2006. The highest ozone concentration observed during that period was  $\sim 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\sim 101 \text{ ppb}_v$ ). The model simulations indicate that the contribution of biogenic VOC emissions to ozone formation is lower in June (9-11%) and August (6-9%) than in July (17-20%). On particular days within the analyzed heat wave period, this contribution increases up to 60%. The actual contribution is expected to be even higher as the model underestimates isoprene concentrations over urban forests and parks by 0.6-1.4  $\text{ppb}_v$ . Our study demonstrates that biogenic VOCs can considerably enhance air pollution during heat waves. We emphasize the dual role of vegetation for air quality and human health in cities during warm seasons, which is removal and lessening versus enhancement of air pollution. The results of our study suggest that reduction of anthropogenic sources of NO<sub>x</sub>, VOCs, and PM, for example, reduction of the motorized vehicle fleet, would have to accompany urban tree planting campaigns to make them really beneficial for urban dwellers.

城市植被排放物与人为排放物相结合产生臭氧和颗粒物的可能性早已得到认可。这种可能性随着温度的升高而增加，并可能导致热浪期间人口稠密地区的空气质量出现严重问题。

研究了热浪如何影响城市/郊区植被的挥发性有机化合物的排放以及相应的地面臭氧和颗粒物。使用大气化学天气研究和预报模型 (WRF-Chem) 与 MEGAN 模拟的植被挥发性有机化合物 (BVOCs) 排放，以量化 2006 年热浪期间德国柏林的一些反馈。

**在此期间观察到的最高臭氧浓度为  $\sim 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $\sim 101 \text{ ppb}_v$ )。模型模拟表明，生物 BVOCs 排放对臭氧形成的贡献在 6 月 (9-11%) 和 8 月 (6-9%) 低于 7 月 (17-20%)。在所分析的热浪期间的特定日子里，这一贡献会增加高达 60%。由于该模型低估了城市森林和公园的异戊二烯浓度 0.6-1.4  $\text{ppb}_v$ ，因此预计实际贡献会更高。**

研究表明，生物BVOCs 会大大加剧热浪期间的空气污染。我们强调在温暖季节，植被对城市空气质量和人类健康的双重作用，即消除和减轻空气污染，而不是加强空气污染。减少 NO<sub>x</sub>、VOCs 和 PM 的人为来源，例如减少机动车队，必须与城市植树活动相辅相成，才能使它们真正有益于城市居民。

# 研究问题的探索 - 生物源BVOCs对臭氧贡献前期研究举例



Atmospheric Research  
Volume 231, 1 January 2020, 104656



## Estimation of biogenic VOC emissions and their corresponding impact on ozone and secondary organic aerosol formation in China

Kai Wu<sup>a</sup>, Xianyu Yang<sup>a</sup>, 吴倩, Dean Chen<sup>b</sup>, Shan Gu<sup>a</sup>, Yaqiong Lu<sup>c</sup>, Qi Jiang<sup>a</sup>, Kun Wang<sup>d</sup>, Yihan Ou<sup>a</sup>, Yan Qian<sup>a</sup>, Ping Shao<sup>a</sup>, Shihua Lu<sup>a</sup>

Show more ▾

+ Add to Mendeley Share Cite

<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104656>

[Get rights and content](#)

### Highlights

- BVOC emissions in China were estimated at high spatial resolution by MEGAN in 2017.
- The impact of BVOC emissions on O<sub>3</sub> and SOA in China was analyzed by WRF-CMAQ model.
- BVOC emissions were 23.54 Tg with a peak in summer and decreasing going north.
- BVOC emissions significantly increased surface O<sub>3</sub> and SOA concentrations in China.
- Controlling anthropogenic emissions would reduce both ASOA and BSOA.

生物源性挥发性有机化合物 (BVOCs) 在全球环境化学和气候中发挥着重要作用。

基于天然气体和气溶胶排放模型 (MEGAN) 估算了2017年中国的生物源排放, 并制定了三个平行情景, 利用WRF-CMAQ模拟系统研究了2017年7月BVOC排放对臭氧和二次有机气溶胶 (SOA) 形成的影响。生物源排放估计为23.54 Tg/年, 夏季达到峰值, 从南向北逐渐减少。

**中国东部和西南部的高BVOCs排放增加了地面臭氧水平, 特别是在京津冀、四川盆地、长三角和珠江三角洲中部地区, 增加量高达47 μg/m<sup>3</sup>。**

夏季, 中国上空形成的大部分SOA集中来自生物源, 长三角地区的SOA浓度普遍高于其他地区。

在保持生物源排放不变的情况下, 排除人为排放, 中国的SOA浓度降低了60%, 这表明人为排放可以与生物源排放相互作用, 从而促进生物源SOA的形成。

结果表明, 控制人为排放将导致人为和生物源性SOA的减少。

# 研究问题的探索 - BVOCs对臭氧贡献观测量化前期研究举例

ENVIRONMENTAL  
Science & Technology

pubs.acs.org/est

Open Access

This article is licensed under [CC-BY 4.0](#)

Article

## Significant Biogenic Source of Oxygenated Volatile Organic Compounds and the Impacts on Photochemistry at a Regional Background Site in South China

Xiaopu Lyu,\* Hongyong Li, Shun-Cheng Lee, Enyu Xiong, Hai Guo, Tao Wang, and Joost de Gouw

Cite This: *Environ. Sci. Technol.* 2024, 58, 20081–20090

Read Online

ACCESS |

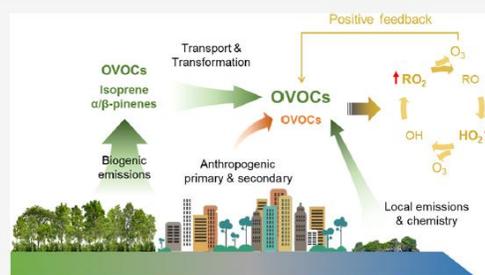
Metrics & More

Article Recommendations

Supporting Information

**ABSTRACT:** Oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) significantly modulate atmospheric chemistry, but the sources and air quality impacts of OVOCs in aged urban outflows remain to be elucidated. At a background site in South China, the ozone formation potential of six nonformaldehyde OVOCs studied was equivalent to that of 3.56 ppbv of formaldehyde, more than half of which was contributed by acetaldehyde. Source apportionment incorporating photochemical age revealed that considerable fractions (52.7%–62.6%) of the OVOCs were of biogenic origin, except for ethanol, which was primarily derived from anthropogenic emissions. The oxidation of *cis*-/*trans*-2-butene explained 71.1% of the in situ acetaldehyde formation. In contrast,  $\alpha/\beta$ -pinenes and isoprene contributed 73.8% and 28.4% to acetone and methylglyoxal formation, respectively. An average of 12.4% of net in situ ozone ( $O_3$ ) production rate was attributed to the OVOCs studied, where the biogenic fractions accounted for 59%. The changes in the  $O_3$  production rate and hydroxyl radical (OH) concentration caused by OVOCs were mainly affected by ozone formation sensitivity. The effects of primary acetaldehyde and acetaldehyde-led  $O_3$  on secondary acetaldehyde formation were weak at this background site; however, they cannot be ignored in polluted areas. This study provides a scientific basis for mitigating  $O_3$  pollution driven by biogenic emissions and OVOCs.

**KEYWORDS:** oxygenated volatile organic compounds, ozone pollution, biogenic emissions, acetaldehyde, photochemistry



**生物源是OVOCs主要来源：**在华南背景站点，超过一半的OVOCs（如乙醛、丙酮等）来自生物排放或其前体物氧化，其中乙醛的生物源贡献高达61.5%，远超人为排放。

**关键化学路径解析：**乙醛主要由顺/反-2-丁烯氧化生成（占71%），丙酮主要来自 $\alpha/\beta$ -蒎烯（74%），而甲基乙二醛则与异戊二烯氧化密切相关（28%）。

**OVOCs显著影响臭氧生成：**OVOCs贡献了12%的臭氧生成速率，其中生物源占比59%，且其作用强度与臭氧生成敏感性（NO<sub>x</sub>/VOC化学机制）直接相关（2020年10-11月）。

**自由基循环被重塑：**OVOCs光解提升HO<sub>2</sub>和RO<sub>2</sub>浓度10%以上，但因NO<sub>x</sub>不足导致OH自由基减少3%，在低NO<sub>x</sub>环境下可能抑制大气氧化能力。

**OVOC与臭氧存在双向反馈：**乙醛等OVOCs既促进臭氧生成，臭氧又反过来通过氧化烯烃再生OVOCs，这种循环效应在污染地区可能更显著，需纳入臭氧控制策略。

（来源：《Environmental Science & Technology》期刊；香港浸会大学等；南信大大气污染REACH研究组；网络公开资料；2020-2025）

# 研究问题的探索 - BVOCs协同O<sub>3</sub>对PM<sub>2.5</sub>生成贡献研究最近综述

第 32 卷 第 3 期 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学) Vol. 32 No. 3  
2025 年 5 月 Earth Science Frontiers (China University of Geosciences(Beijing); Peking University) May 2025

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2025.3.26

## 全球变化背景下天然源痕量活性有机气体研究进展与展望

张艳利, 冉浩汎, 曾建强, 鲁钰婷, 庞伟华, 郭昊, 王新明\*

1. 中国科学院广州地球化学研究所 先进环境装备与污染防治技术全国重点实验室, 广东 广州 510640
2. 中国科学院大学, 北京 100049

ZHANG Yanli, RAN Haofan, ZENG Jianqiang, LU Yuting, PANG Weihua, GUO Hao, WANG Xinming\*

1. State Key Laboratory of Advanced Environmental Technology, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

ZHANG Yanli, RAN Haofan, ZENG Jianqiang, et al. Advances and perspectives of biogenic reactive trace volatile organic compounds in the context of global change. *Earth Science Frontiers*, 2025, 32(3): 288-310

**Abstract:** Biogenic volatile organic compounds (BVOCs) are critical trace reactive organic gases in the Earth system, playing vital roles in global carbon cycling, atmospheric chemistry, and climate regulation. BVOCs react rapidly with atmospheric oxidants (e.g., OH, O<sub>3</sub>, and NO<sub>3</sub>), driving the formation of secondary organic aerosols (SOA), which modulate radiative forcing and influence regional and global climates. Furthermore, BVOCs interact with tropospheric and stratospheric ozone and alter hydroxyl radical (OH) concentrations, indirectly affecting the lifecycles of greenhouse gases. Global BVOC emissions are estimated to exceed 1000 TgC annually, with forests being the primary source and isoprene and monoterpenes dominating the emissions. Recent advancements in BVOC emission monitoring technologies have significantly improved the resolution and accuracy of emission measurements. Traditional offline sampling and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) have been complemented by high-temporal-resolution online techniques such as proton-transfer-reaction mass spectrometry (PTR-MS) and time-of-flight mass spectrometry (PTR-ToF-MS). Additionally, multi-scale monitoring tools, including drones, satellite remote sensing, and ground-based flux towers, provide unprecedented capabilities for studying the spatial and temporal dynamics of BVOC emissions. By integrating dynamic chamber methods, eddy covariance techniques, and modeling approaches, researchers are progressively refining BVOC emission inventories, paving the way for deeper insights into the complex feedback mechanisms between BVOCs and climate change.

Environmental factors regulating BVOC emissions have been extensively studied. Light and temperature are key drivers, with light intensity directly influencing photosynthesis and isoprene emissions, while rising temperatures accelerate BVOC biosynthesis and volatilization. Elevated CO<sub>2</sub> concentrations may modulate BVOC emissions through photosynthetic regulation and reduced stomatal conductance, although long-term effects vary by plant species and adaptive strategies. Increased ozone (O<sub>3</sub>) concentrations exert dual effects on BVOCs, inducing stress-related defensive emissions while potentially damaging foliage and suppressing emissions. Aerosol concentrations exhibit critical positive feedback mechanisms with BVOCs—high BVOC emissions promote SOA formation, and SOA, in turn, modifies photosynthesis and BVOC emissions via light scattering effects. Changes in the nitrogen cycle also impact BVOC emissions, with elevated nitrogen inputs

**BVOCs在大气中通过与氧化剂(如羟基自由基OH、臭氧O<sub>3</sub>和NO<sub>3</sub>自由基)快速反应, 驱动二次有机气溶胶(SOA)的生成, 调节大气辐射强迫, 影响区域和全球气候。**

同时, BVOCs通过对流层与平流层臭氧的交互作用影响大气中羟基自由基(OH)的浓度, 间接参与温室气体的生命周期调控。全球BVOCs排放量估计为每年1,000 Tg碳以上, 主要来自森林生态系统, 其中异戊二烯和单萜占主导地位~~~

近年来, BVOCs排放的观测技术取得了显著进展, ~~~环境因子对BVOCs排放的影响研究日益深入。

光照和温度是控制BVOCs排放的关键因子, **光照强度变化直接影响光合作用及异戊二烯的排放, 而温度升高则加速BVOCs的生物合成和挥发。**二氧化碳(CO<sub>2</sub>)浓度的升高可能通过光合作用调节BVOCs的排放强度, 同时降低气孔导度减BVOCs的释放速率, 但其长期效应可能因植物种类和适应机制的差异而有所变化。

臭氧(O<sub>3</sub>)浓度升高对BVOCs的作用具有双重效应:一方面通过胁迫反应诱导BVOCs的防御性释放, 另一方面可能损伤叶片并抑制排放。

气溶胶浓度和BVOCs之间存在重要的正反馈机制, **高BVOCs排放可促进SOA生成, 而SOA形成反过来通过散射光效应影响光合作用与BVOCs排放~~~**

# 现实需求与困难 - 以广东精细化空气质量管理为例

## 广东省生态环境厅等11部门 广东省臭氧污染防治（氮氧化物和挥发性有机物协同减排） 实施方案（2023-2025年） 粤环函〔2023〕45号

（实施方案因为缺乏研究支撑尚未列入生物源BVOCs影响内容，聚焦在人为源控制；长三角省市近年方案也没有）

### JGR Atmospheres

Research Article |  Free Access

#### Role of Heat Wave-Induced Biogenic VOC Enhancements in Persistent Ozone Episodes Formation in Pearl River Delta

Haolin Wang, Kai Wu, Yiming Liu, Bosi Sheng, Xiao Lu, Yuanping He, Jielan Xie, Haichao Wang   
Shaojia Fan 

First published: 02 June 2021 | <https://doi.org/10.1029/2020JD034317> | Citations: 12

2017年HW期间， $O_3$ 的增加速率为  $27.1 \mu\text{g m}^{-3} / ^\circ\text{C}$ ，反映了高温下 $O_3$ 的快速形成。与非HW（NHW）相比，气相化学和垂直传输是 $O_3$ 形成的主要贡献者。

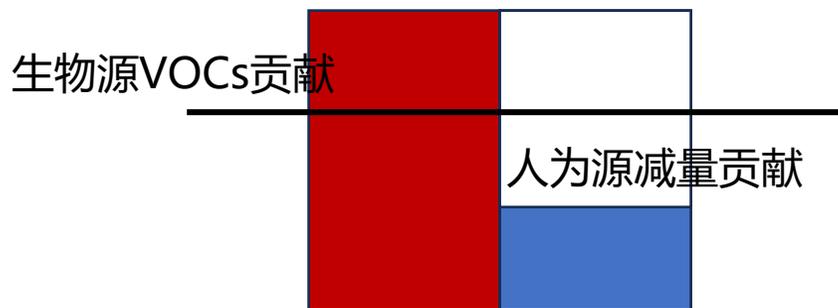
**敏感性实验表明，BVOCs对珠江三角洲地面 $O_3$ 形成的贡献高达  $42.1 \mu\text{g m}^{-3}$ ，因为HW中的BVOCs排放量比NHW高  $430 \text{ mol d}^{-1}$ 。**

在北风和强海陆风下，来自农村地区的BVOCs和氧化产物被输送到顺风向VOCs限制状态，由于强烈的光化学反应和积累的 $O_3$ 前体，导致严重的 $O_3$ 污染。

这些发现指出了HW诱导的BVOCs增强对 $O_3$ 形成的重要作用，并建议在城市绿化策略中考虑种植树木的BVOCs排放潜力，以避免BVOCs的抵消效应。

# 研究问题的提出 - 分离量化预测生物源BVOCs的双重贡献

研究需要推进到关键的城市尺度生物源BVOCs对臭氧贡献的量化  
以及BVOCs协同臭氧驱动二次有机PM<sub>2.5</sub>生成贡献的量化



- 优良天数比例或PM<sub>2.5</sub>新阶段指标
- 空气质量标准提升规划
- 公众环境健康服务规划与指南
- 植物物种绿化策略
- 被动变主动气候适应
- 可持续环境管理





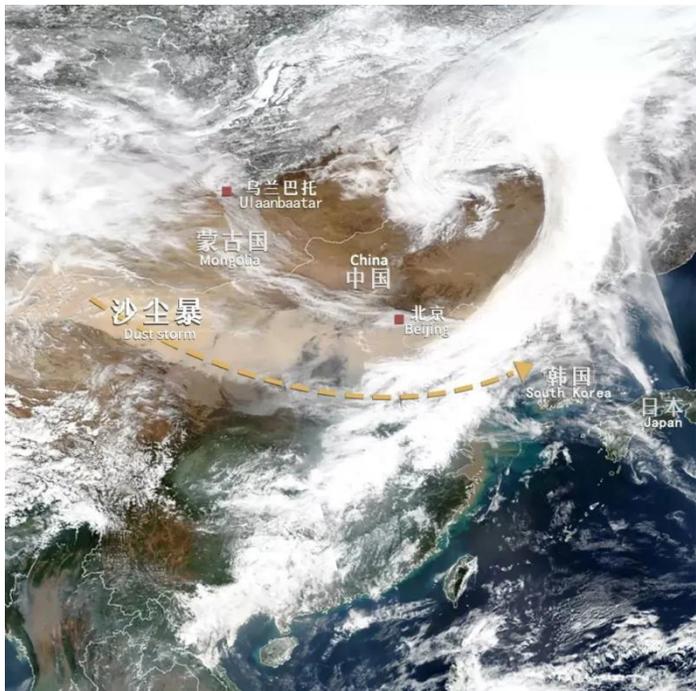
# 03

分离量化预测长距离传输沙尘暴对  
华东华中西南华南 $PM_{2.5}$ 影响的问题

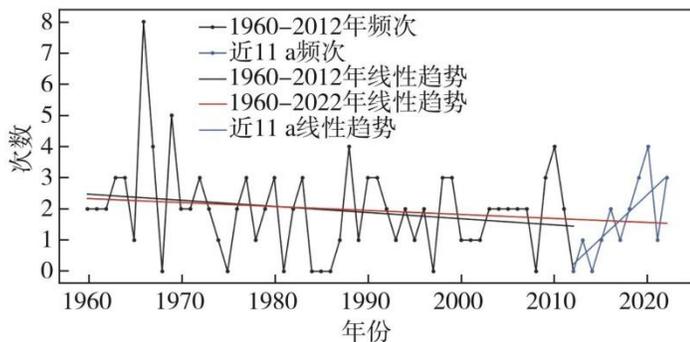
# 问题的背景 - 南北向传输沙尘暴越来越频繁影响到中南部

蒙古国超过70%国土荒漠化，沙尘暴频繁严重

2024年全国城市沙尘天气空间分布示意图



我国寒潮2012-2022年寒潮频次转为显著上升趋势



由于北极海冰快速融化，冬季北极地区上空大气吸收热量，北极对全球增暖的放大效应凸显，大气不稳定性加剧。

大气呈现南北向环流特征，冷气团偏离极区位置，使得高纬度强冷空气容易向南侵袭，出现所谓“暖北极、冷欧亚”现象。

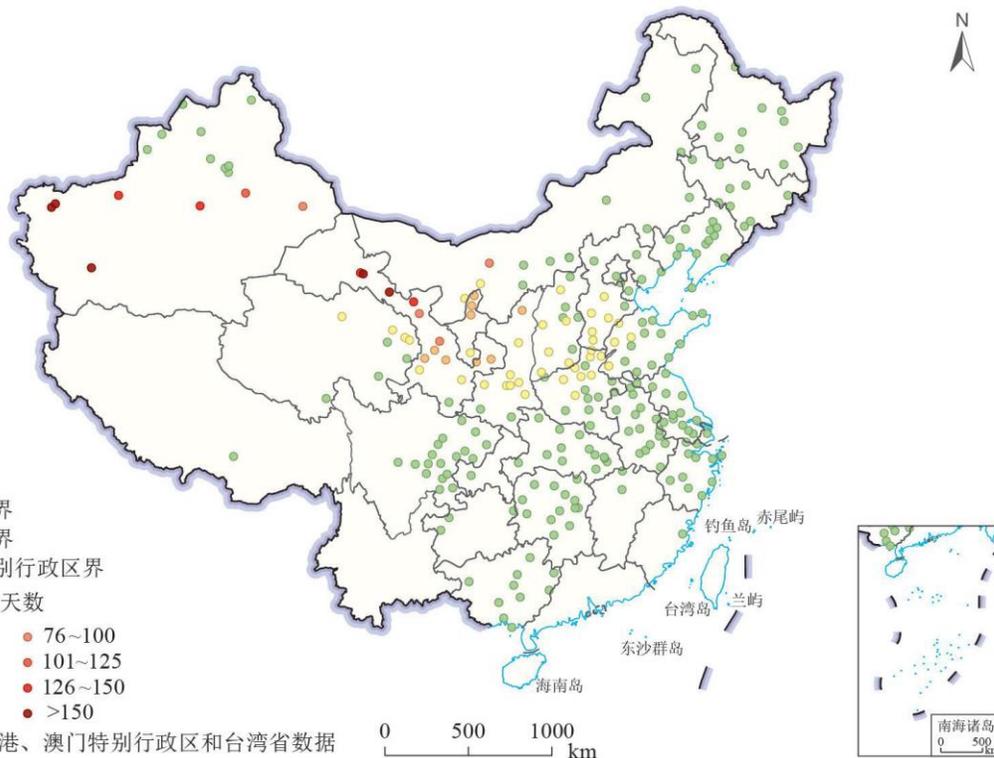
图例

- 未定 国界
- 省界
- 特别行政区界

沙尘天气天数

- 1~30
- 31~50
- 51~75
- 76~100
- 101~125
- 126~150
- >150

未包括香港、澳门特别行政区和台湾省数据



# 问题的背景 - 南北向传输沙尘过程甚至影响华南区域

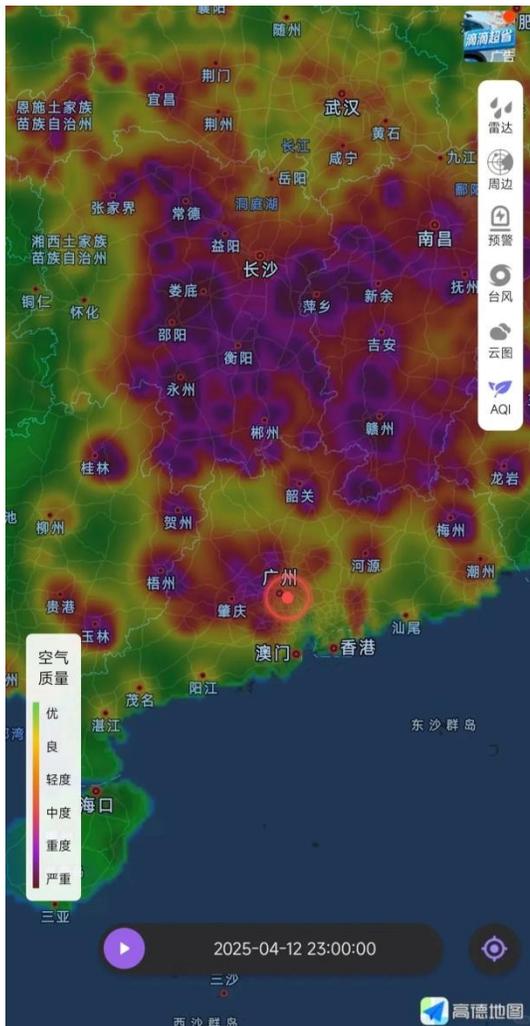
## 蒙古沙尘暴跨2000公里袭粤！气象专家详解成因，广东人如何应对？

2025-04-14 21:25 · 花城美羊羊

4月13日，广东多地天空灰蒙，空气质量指数“爆表”，市民惊呼“空气中弥漫着土腥味”。其中广州PM10浓度峰值超500微克/立方米，达“严重污染”级别。这场异常的浮尘天气，竟是源自蒙古国的沙尘暴，跨越2000多公里后“空降”广东，成为近15年来影响华南最明显的沙尘过程。



广州天空灰蒙蒙，小蛮腰都看不见了



广州市人民政府  
The People's Government of Guangzhou Municipality

推荐 新闻 公开 服务 互动 营商 人文

当前位置：首页 > 专题 > 防灾救灾 安全广州 > 防灾提示

### 广州遇15年最明显沙尘天气

2025-04-14 来源：广州日报 A+ | A | A- | 2141次

4月15日将显著改善 气象部门提醒关门窗戴口罩

受北方沙尘天气南下引起的浮尘天气影响，4月13日广州空气质量显著变差。广州市空气质量实时发布系统的监测结果显示，4月13日14时，广州全市空气质量指数（AQI指数）为314，罕见地达到了严重污染级别，首要污染物是可吸入颗粒物（PM10）。

(来源：广州市政府；今日头条等；高德地图；网络公开资料；2020-2025)

# 问题的背景 - 传输沙尘作为凝结核同时促进南方清洁湿润城市PM<sub>2.5</sub>生成增长



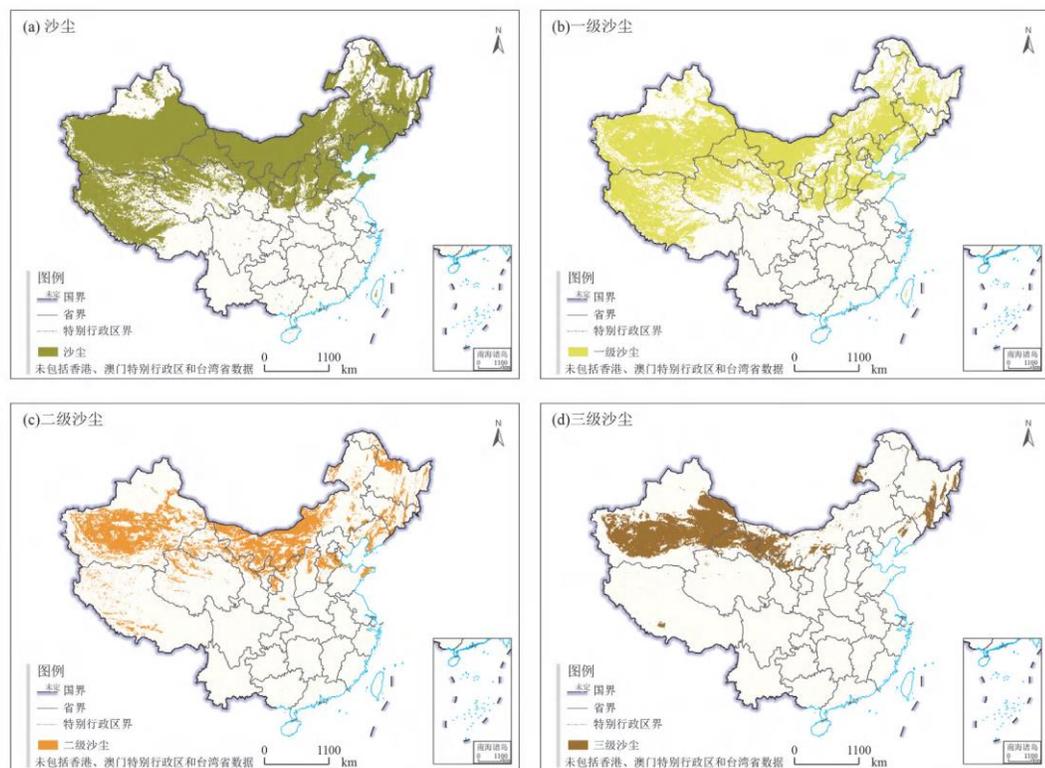
(来源：新华社，中国日报网，2010-03-22；福州新闻等，2023-4-13日，2025-4-13；网络公开资料，2024年福州市PM<sub>2.5</sub>年均浓度20微克/立方米；2010-2025)

# 现实需求与困难 - PM<sub>2.5</sub>关键vs沙尘传输到南方难以分辨贡献

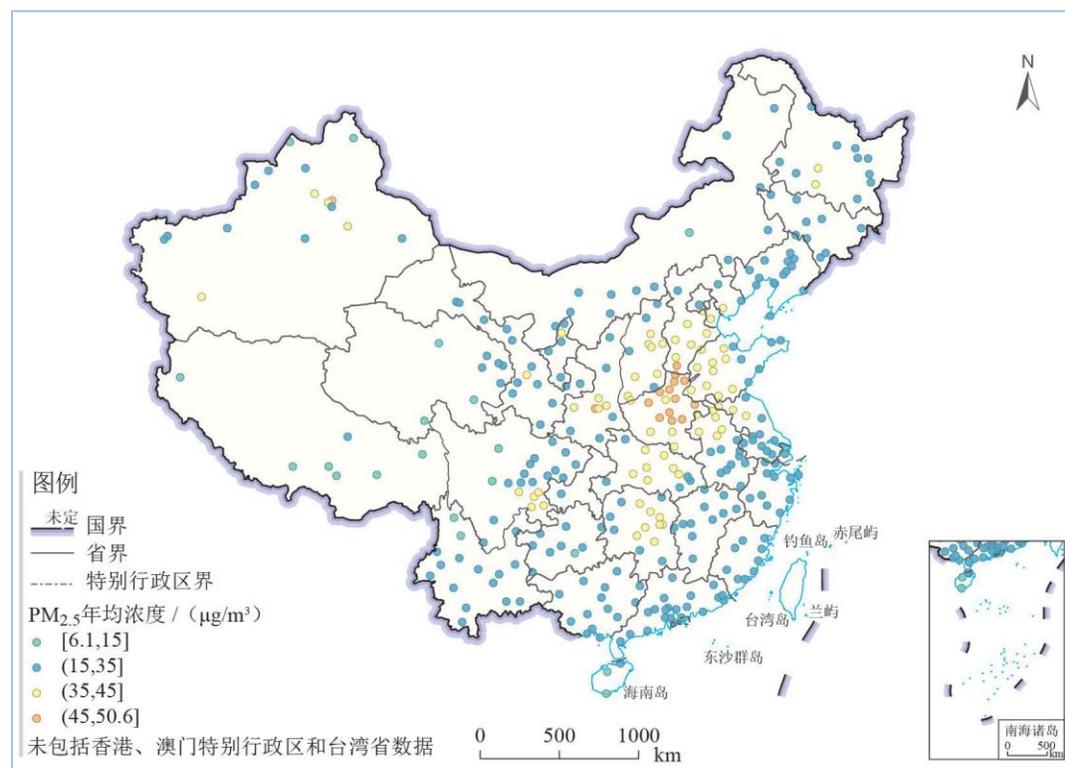
《美丽中国》目标，2027年全国PM<sub>2.5</sub>平均浓度下降到28微克/立方米以下，2035年下降到25微克/立方米以下。

《美丽广东》等目标为例，2021年PM<sub>2.5</sub>浓度已降至21微克/立方米，到2035年力争下降到15微克/立方米。

蒙古国沙漠化趋势在2025-2035年十年很难扭转改善，沙尘暴传输影响PM<sub>2.5</sub>浓度需要纳入本底变化考虑。



2024年全国沙尘遥感监测等级分布示意图

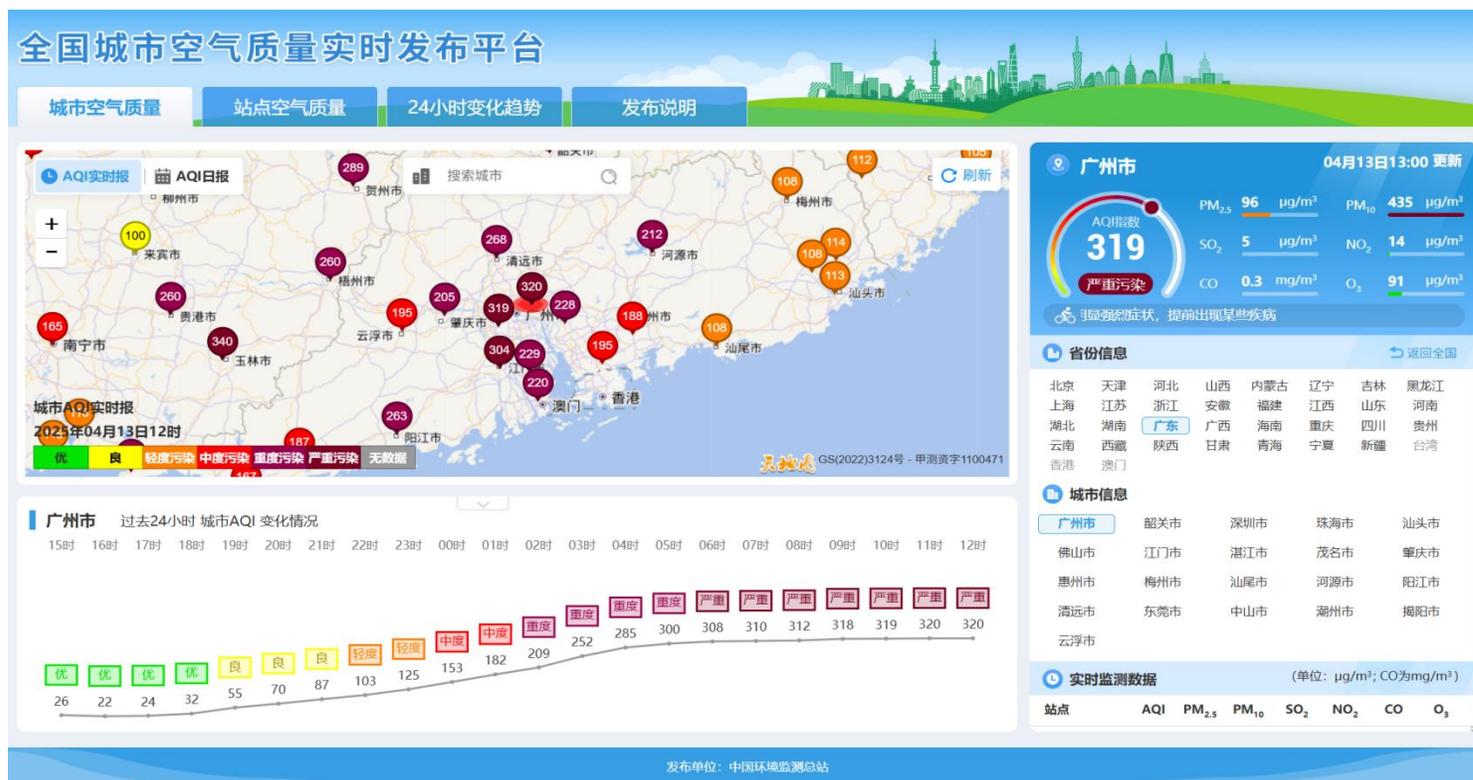


2024年全国城市环境空气质量PM<sub>2.5</sub>浓度区间分布示意图

(来源：《2024中国生态环境状况公报》；网络公开资料；2020-2025)

# 研究问题的提出 - 分离量化预测长距离沙尘传输贡献

华东、华中、西南、华南：需要区分量化城市本地与北方沙尘暴传输的PM<sub>2.5</sub>  
少数沙尘暴显著过程：PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>，结合PM<sub>10</sub>异常升高  
更多不明显沙尘过程：特征地壳元素，EC，遥感AOD反演，其他？



(来源: 中国环境监测总站; 南方都市报等; 网络公开资料; 2020-2025)



# 展望

变被动为主动  
知己知彼

致敬为实现优美蓝天碧水宜居环境积极探索的研究团队