

2025 Yangtze River Delta (YRD) Clean Air Forum

大气氧化性视角下我国PM_{2.5}和O₃污染成因 分析与调控策略思考

陆克定

北京大学环境科学与工程学院

生态环境部大气臭氧污染防治重点实验室

2025.08.28

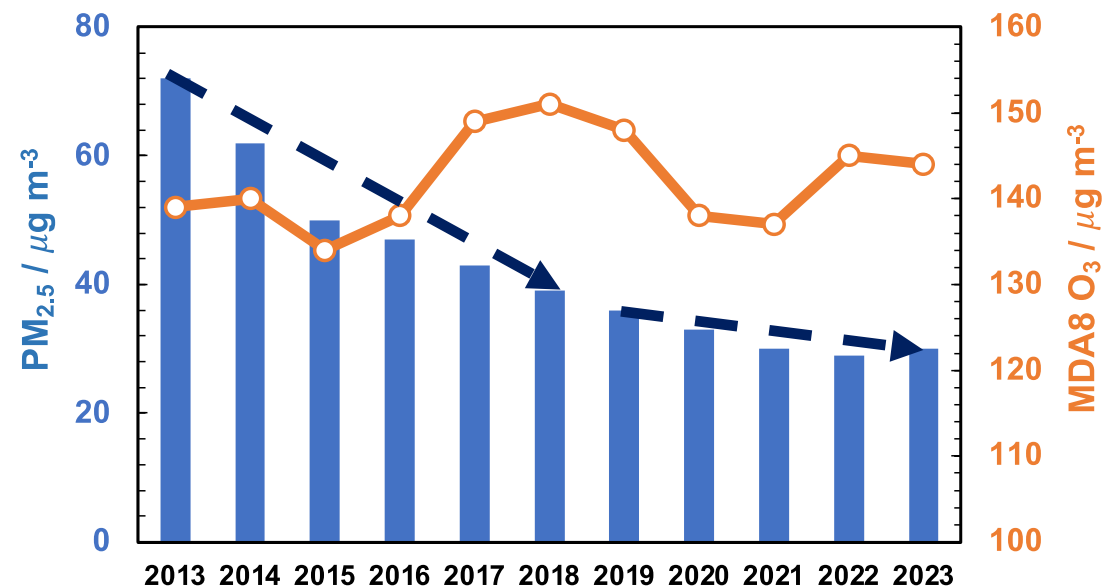
汇报提纲

- **当前大气污染防治面临的新形势**
- 臭氧污染成因剖析
- 二次颗粒物污染成因剖析
- 臭氧和PM_{2.5}耦合机制剖析
- 国家层面总体调控策略思考

PM_{2.5}浓度下降趋势变缓，O₃浓度高位震荡

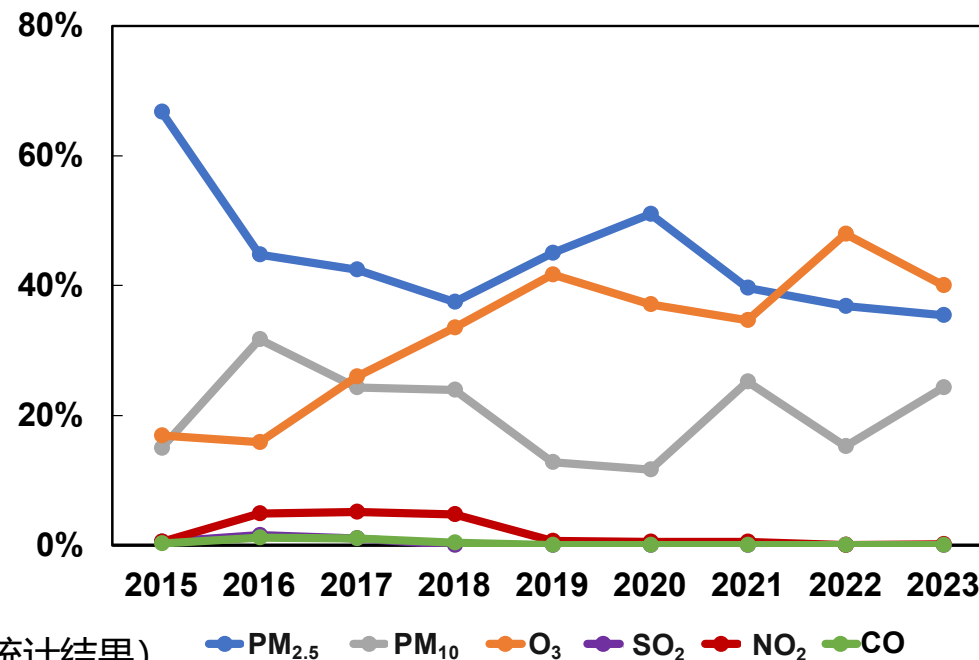
我国PM_{2.5}污染快速改善，但近年来速度明显放缓，边际递减效应凸显

大气十条和蓝天保卫战期间PM_{2.5}和O₃浓度变化趋势



数据来源：中国生态环境状况公报（基于337-339个城市统计结果）

不同首要污染物超标天数在总超标天数中占比

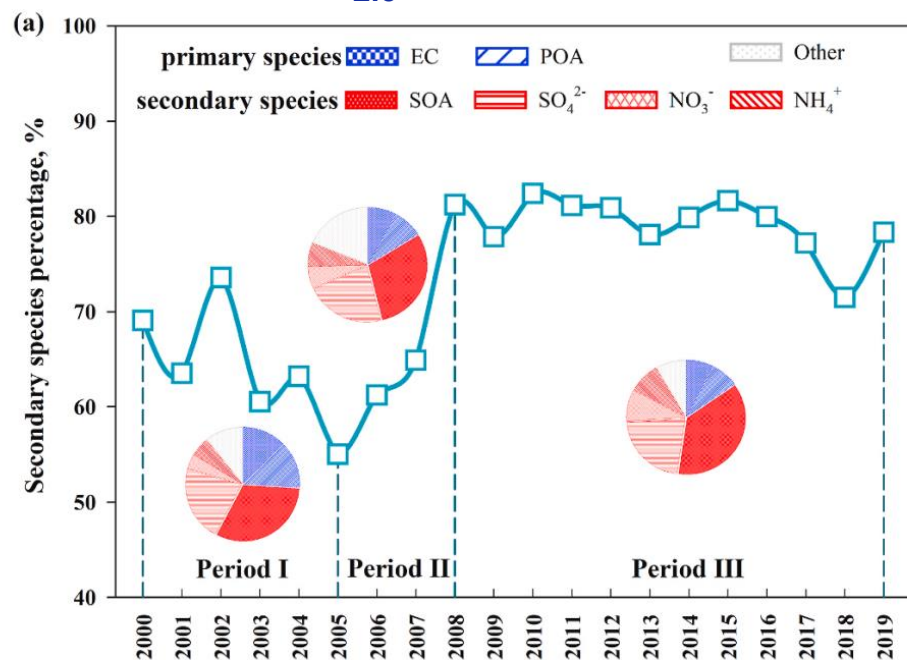


O₃污染无明显改善，浓度呈高位波动态势，O₃污染超标日占比稳定上升

PM_{2.5}二次组分占比逐步升高

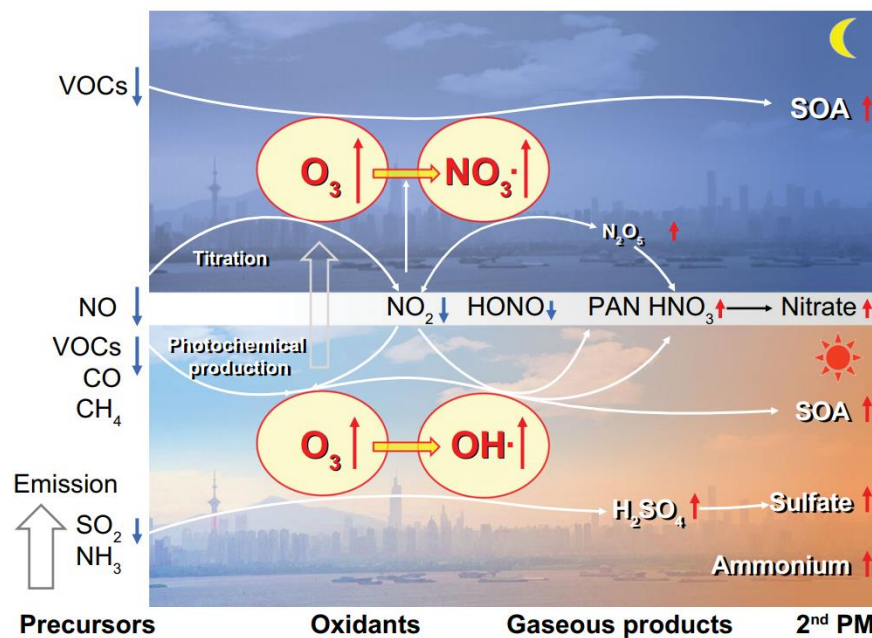
硝酸盐和二次有机气溶胶等二次组分在PM_{2.5}中占比逐渐增大

珠三角地区PM_{2.5}二次组分占比不断升高



Yan et al., AE, 2020

疫情期间NO_x大量减排，二次PM_{2.5}浓度不降反升



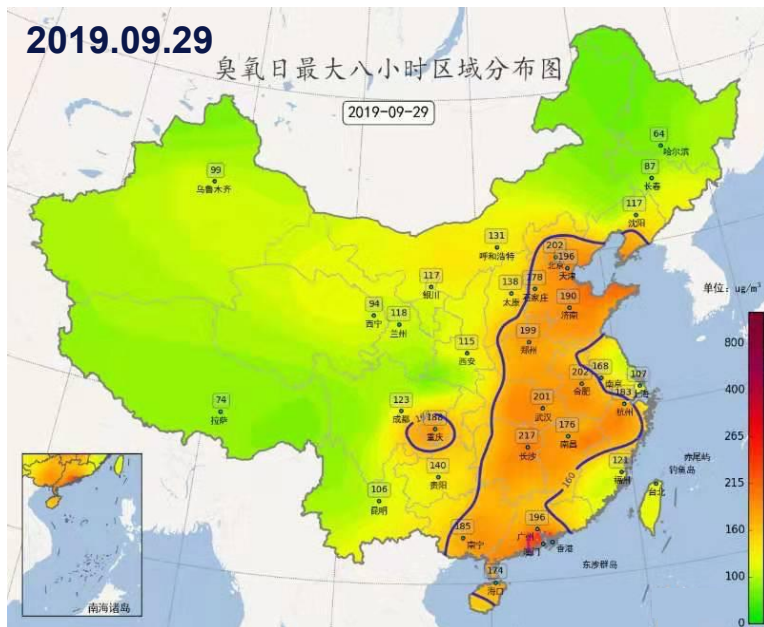
Huang et al., NSR, 2020

PM_{2.5}与前体物减排的非线性响应关系逐渐凸显

O₃污染范围大、持续时间长、向冬春季蔓延

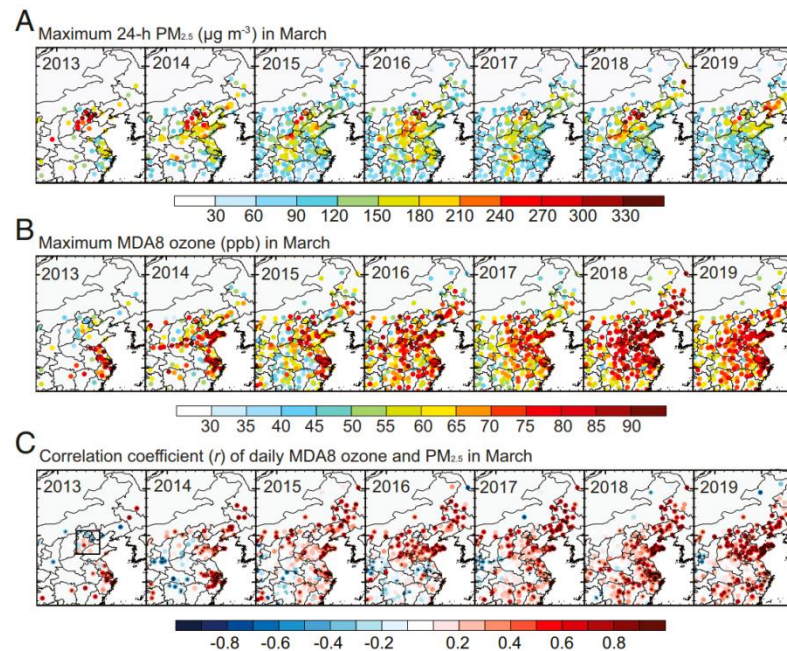
我国东部城市群地区成片式的大范围臭氧污染时有发生，持续十数天

2019年9月底以来东部地区大范围O₃污染



《中国大气臭氧污染防治蓝皮书（2023）》

3月份O₃浓度不断升高，与PM_{2.5}污染同时出现

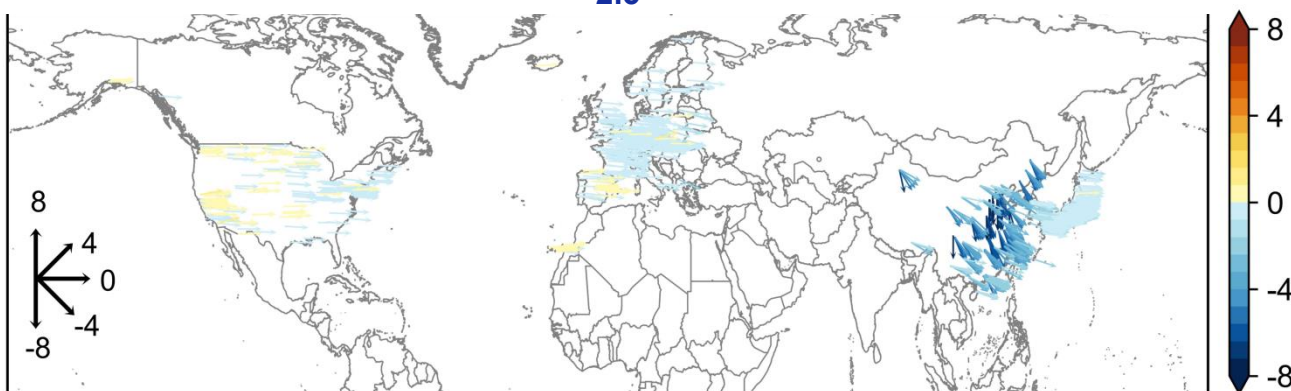


臭氧污染向冬春冷季蔓延，PM_{2.5}和臭氧双高污染进一步加剧

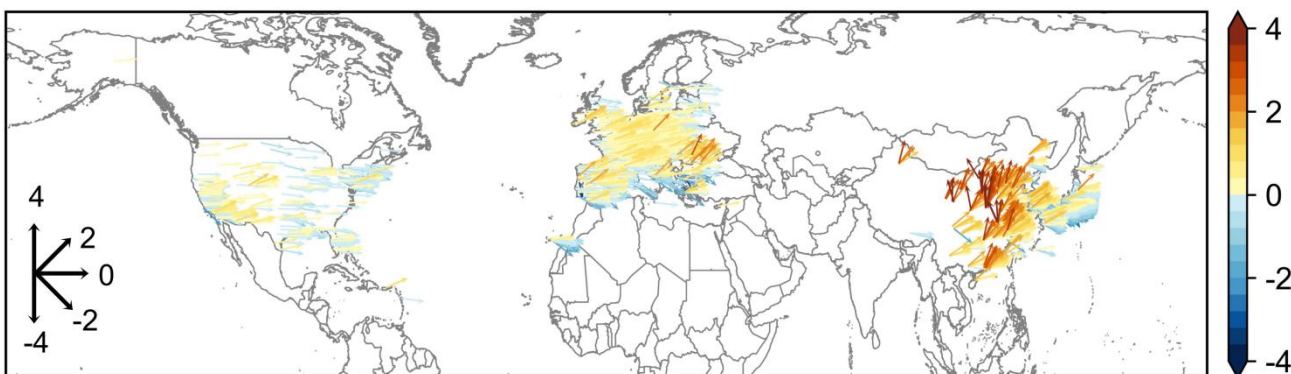
与欧美地区PM_{2.5}和O₃污染改善的对比

过去十年，我国地表PM_{2.5}浓度迅速下降，降幅可达5.1微克/立方米/年
我国是过去10年地表O₃增加显著的区域，但浓度仍显著低于墨西哥城等

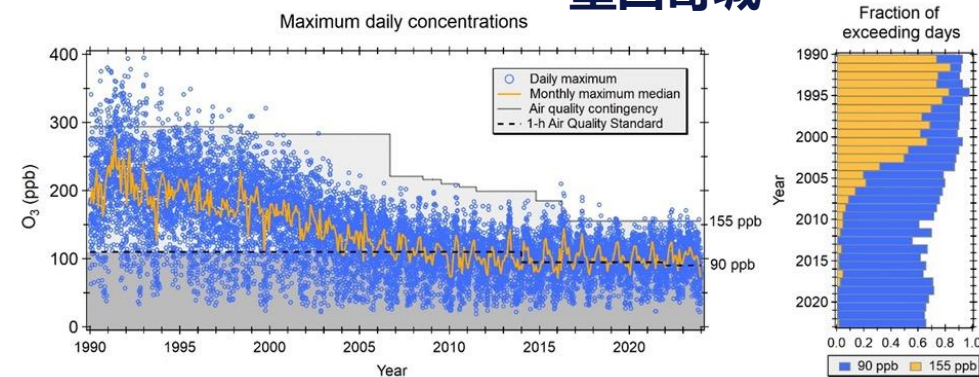
2013-2022年地表PM_{2.5}年平均浓度变化趋势



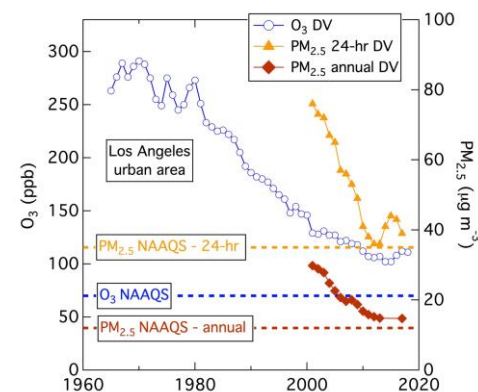
2013-2022年地表O₃ MDA8暖季平均浓度变化趋势



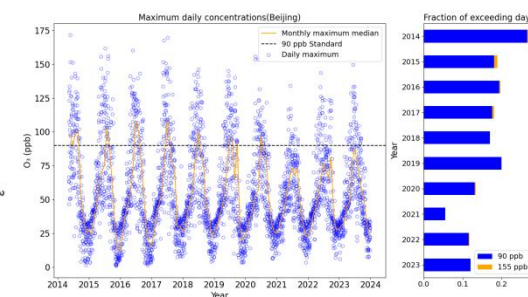
墨西哥城



洛杉矶



北京



- 过去10年PM_{2.5}改善成果显著，臭氧浓度也低于同纬度的超大城市，更远低于欧美经济快速发展阶段的臭氧浓度，PM_{2.5}和臭氧可防可控且均已初见成效。
- 当前，以二次PM_{2.5}和臭氧为代表的二次污染物已成为我国空气质量改善的核心问题，大气环境管理将进入以二次污染防治为主的新阶段。
- 由于二次污染物与前体物的排放存在非线性响应关系，不合理的减排路径将导致空气质量改善效果边际效益递减甚至恶化的情况出现，科学理论指导下的大气污染防治是未来实现空气质量深度改善的关键。

汇报提纲

- 当前大气污染防治面临的新形势
- **臭氧污染成因剖析**
- 二次颗粒物污染成因剖析
- 臭氧和PM_{2.5}耦合机制剖析
- 国家层面总体调控策略思考

O₃污染机制及其影响因素

O₃浓度 = 1. 背景化学 + 2. 区域化学生成 + 3. 局地化学生成 - 4. 沉降 - 5. 化学去除

气候气象（平流层）、CH₄、NO

气象、VOC、NO_x

土地利用类型

气象

● 平流层入侵偶尔发生

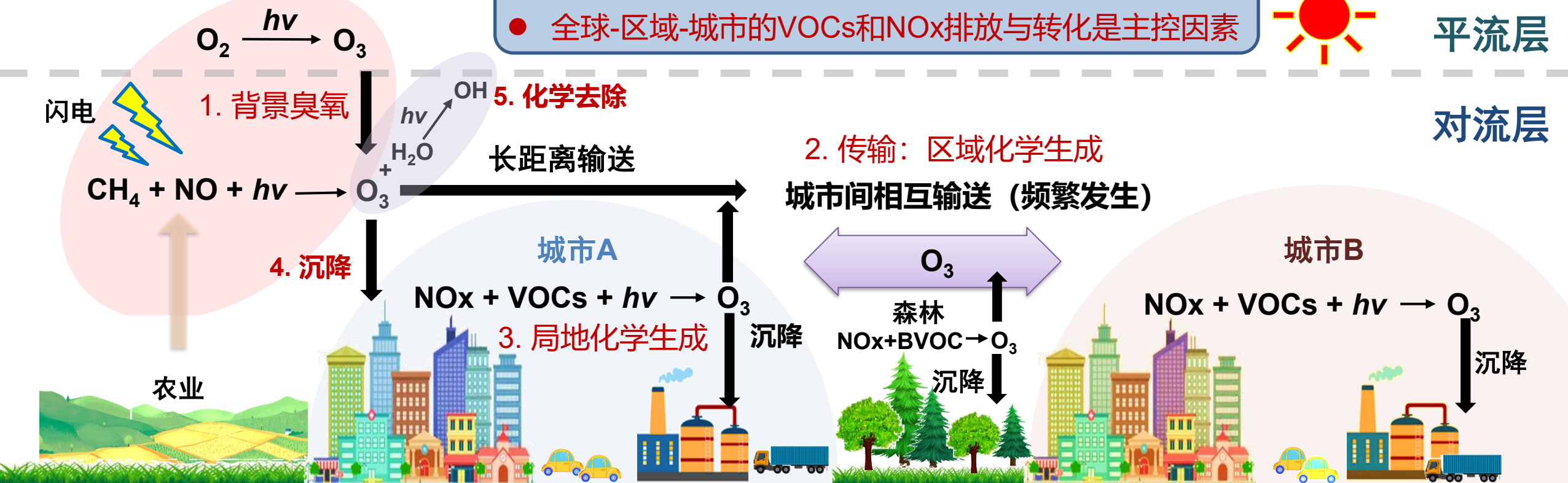
● 气候、气象条件是关键驱动因子

● 全球-区域-城市的VOCs和NO_x排放与转化是主控因素



平流层

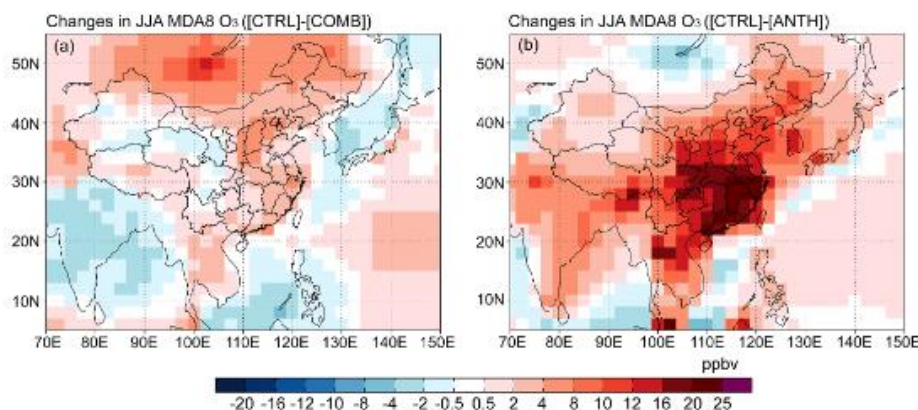
对流层



O₃污染成因与来源-气候与气象因子影响

□ 气候变化对O₃浓度的影响

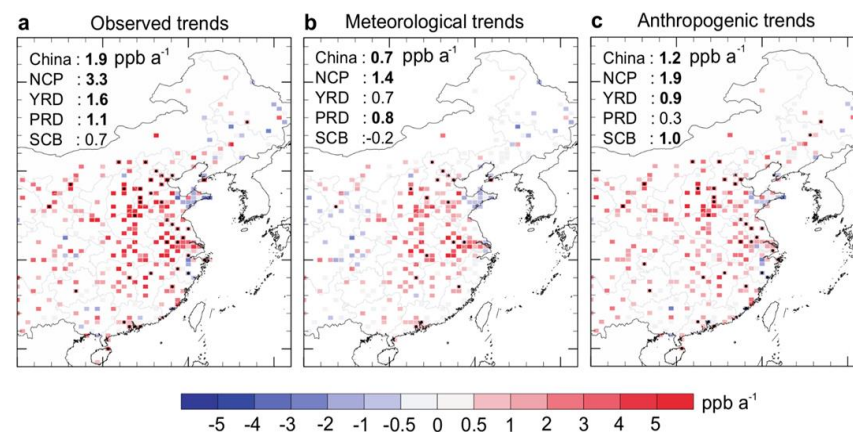
- 在靠近人为污染的区域，气候变化引起的O₃变化速率约为温度每增加1°C，O₃增加0.4~4 μg/m³ ——《IPCC第六次评估报告》
- 在20至30年的时间尺度上，气候变化对中国O₃浓度变化的影响范围约为 -8~+20 μg/m³



1980-2010年气候变化（左）和人为排放（右）对夏季O₃浓度影响

□ 气象条件对O₃年际变化的贡献

- 基于多元线性回归模型（MLR）的研究结果表明，**2013-2019年夏季，气象因素对全国O₃增加趋势的贡献为37%**（其中华北平原为42%，长三角为44%）
- 2019年我国多地遭遇夏季异常高温、干旱的极端天气，导致O₃浓度偏高；2019年华北地区和长三角地区气象条件对O₃浓度同比增加有显著影响，贡献分别为91%和59%。

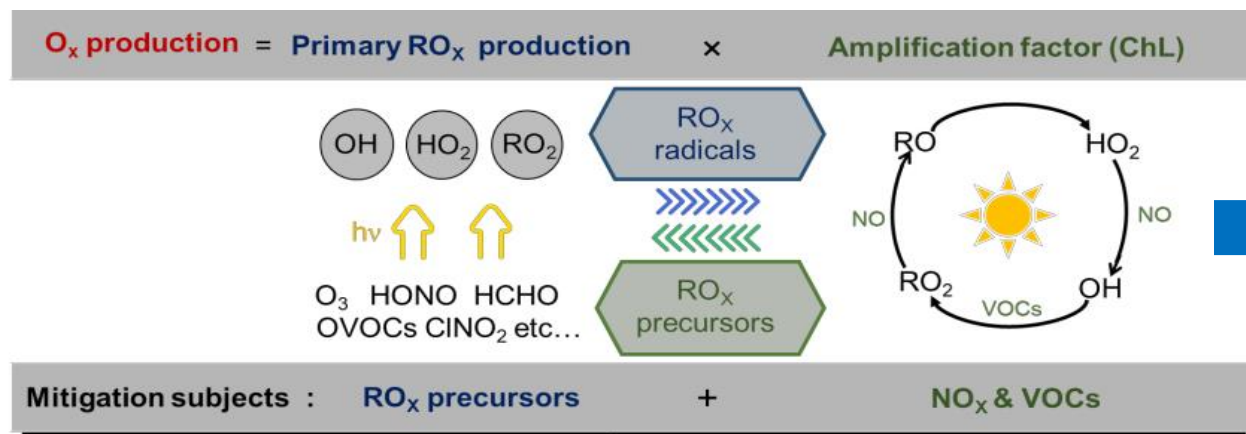


2013-2019年夏季O₃年际变化趋势

O₃污染成因与来源-区域和城市地区的化学转化

概念图

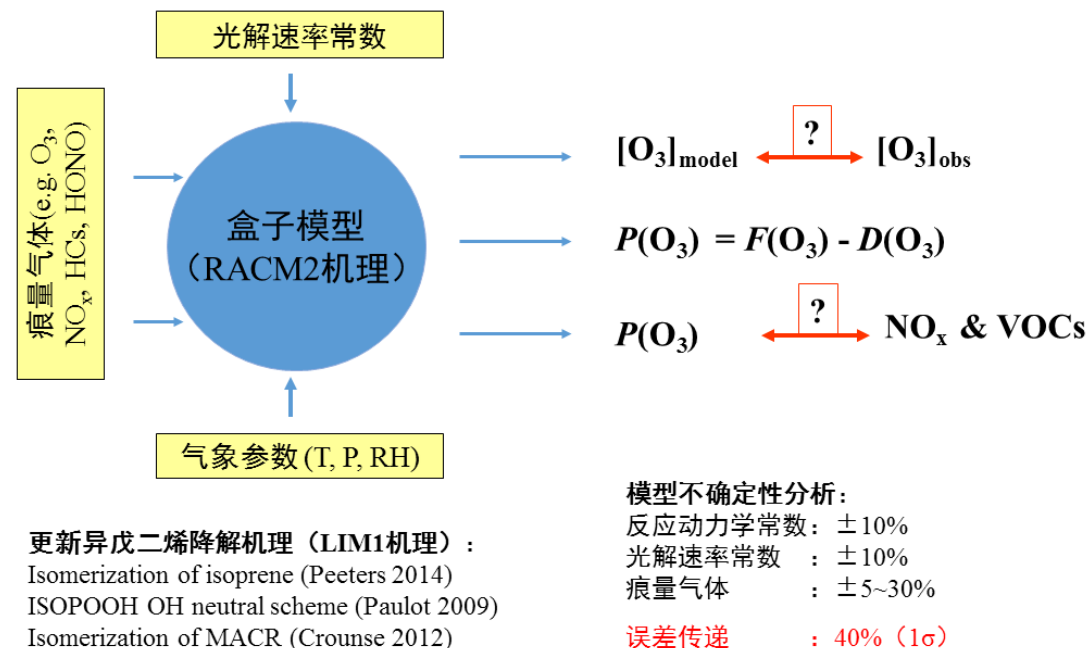
$$P(O_3) = P_{RO_x} \times ChL$$



简化后的两个关键因素:

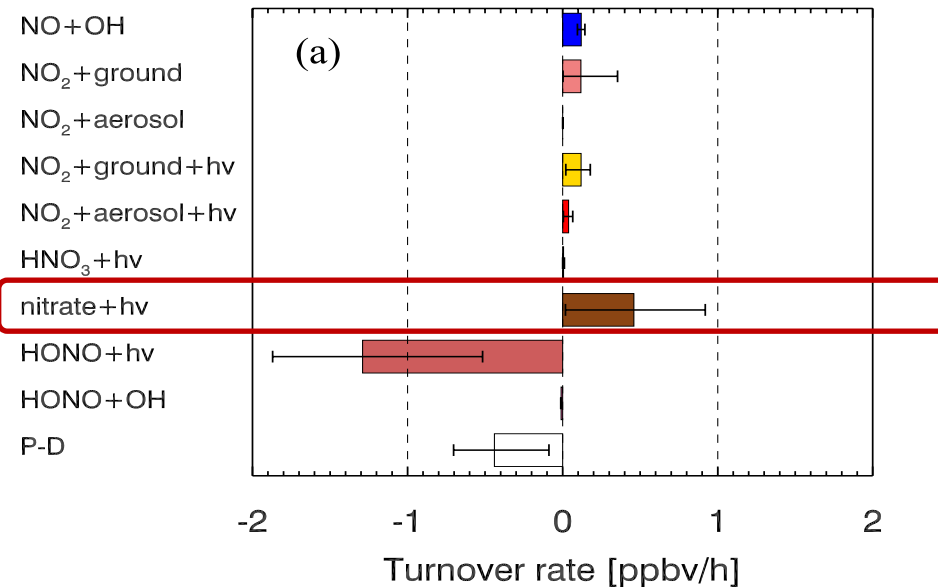
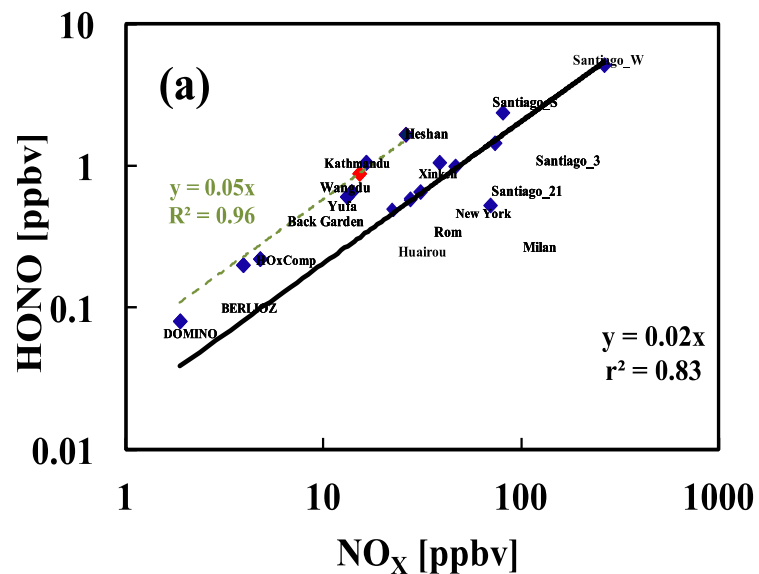
- 1、**自由基初级来源P_{RO_x}**: 与含氮和含氧有机物的光解有关
- 2、**OH-HO₂循环反应ChL**: 与NO_x和VOCs浓度密切相关

盒子模型



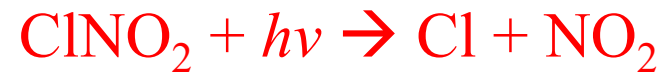
O₃污染成因与来源-区域和城市地区的化学转化

$$P_{\text{ROx}} = F_{\text{UV}} \cdot (a(\text{RH}) \cdot \text{O}_3 + b \cdot \text{Nr} + c \cdot \text{OVOCs})$$



O₃污染成因与来源-区域和城市地区的化学转化

$$P_{\text{ROx}} = F_{\text{UV}} \cdot (a(\text{RH}) \cdot \text{O}_3 + b \cdot \boxed{\text{Nr}} + c \cdot \text{OVOCs})$$



➤ Cl自由基与VOCs反应产生RO₂自由基，RO₂+NO→O₃

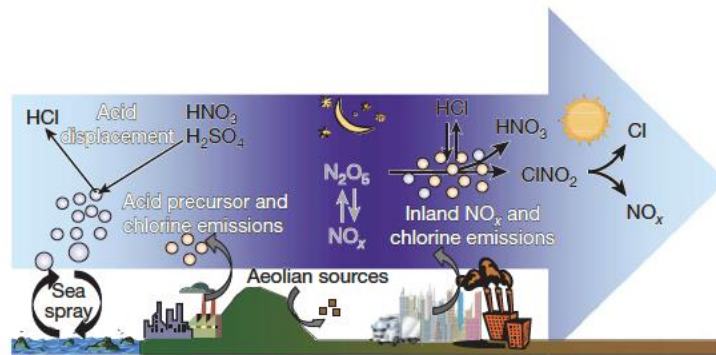


Figure 1 | Schematic of chlorine activation by night-time NO_x chemistry.

(Thornton et al., 2010)

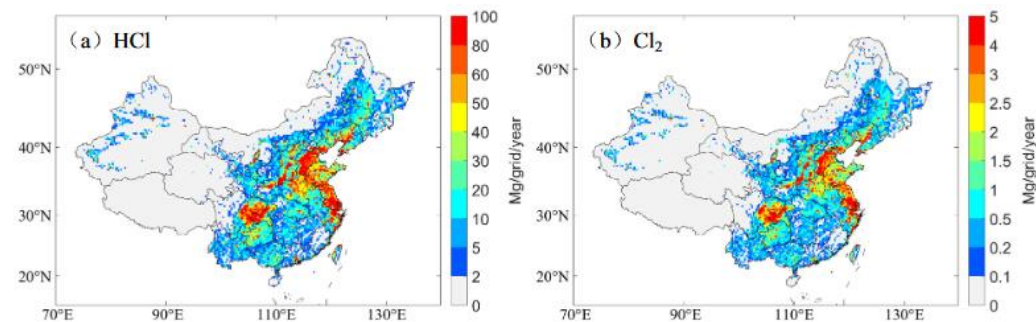


Fig. 1. Spatial distributions of HCl (a) and Cl₂ (b) emissions in the ACEIC 2014.

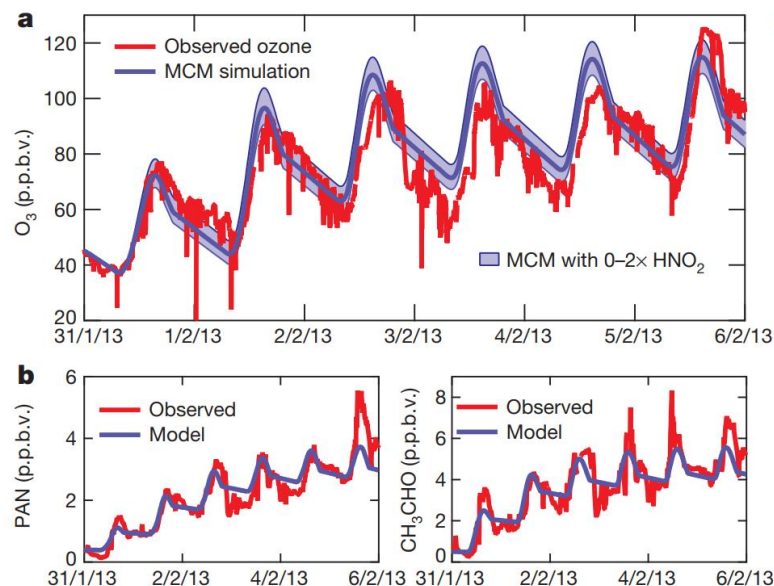
(Hong et al., 2020)

O₃污染成因与来源-区域和城市地区的化学转化

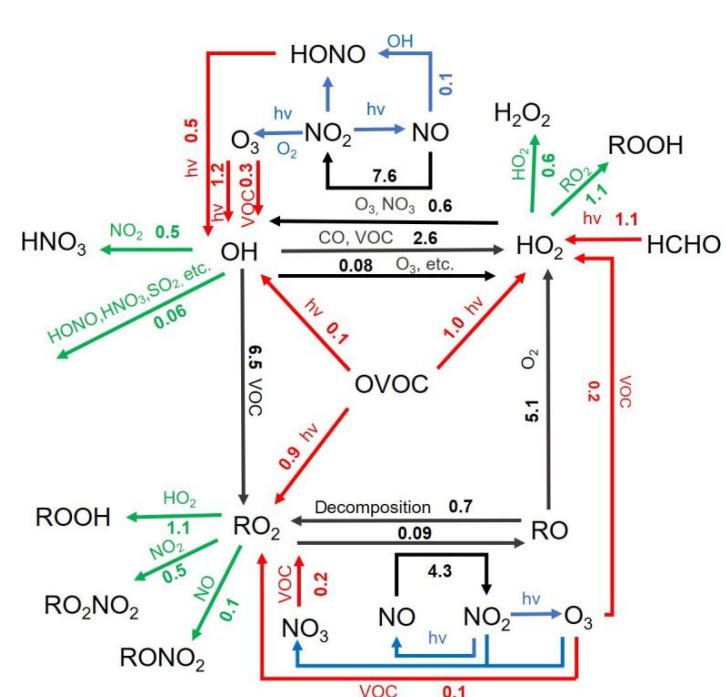
$$P_{\text{ROx}} = F_{\text{UV}} \cdot (a(\text{RH}) \cdot \text{O}_3 + b \cdot \text{Nr} + c \cdot \text{OVOCs})$$

犹他州，美国（冬季臭氧污染！）

山东东营，中国



Edwards et al. (2014 Nature)



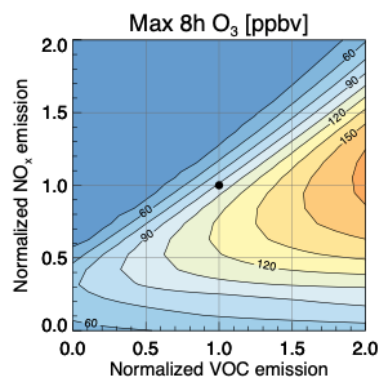
T. Chen et al. (2020 ACP)

- 直接排放和二次产生的OVOCs通过光解产生自由基成为臭氧污染产生的关键前体物

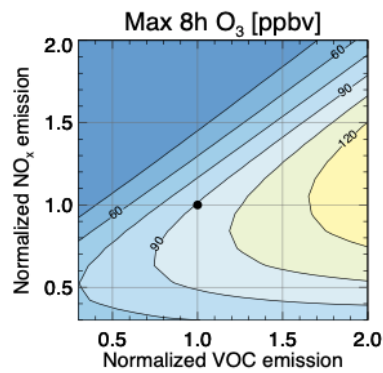
O₃污染成因与来源-区域和城市地区的化学转化

ChL = f(NO_x, VOC, Temp), **Ozone-NO_x-VOCs敏感性分析**

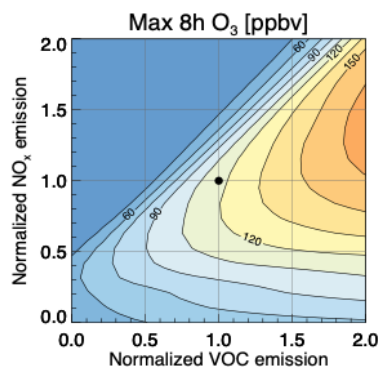
□ 在典型城市O₃主要受VOCs控制，区域O₃主要受VOCs和NO_x控制



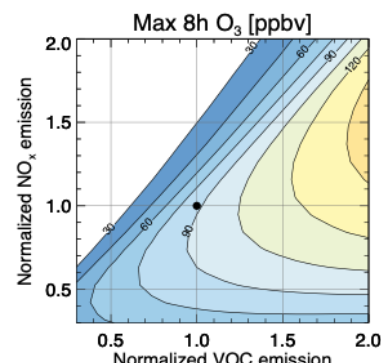
北京 (2019, 城市)



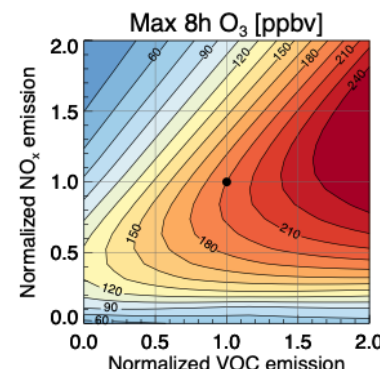
北京 (2020, 城市)



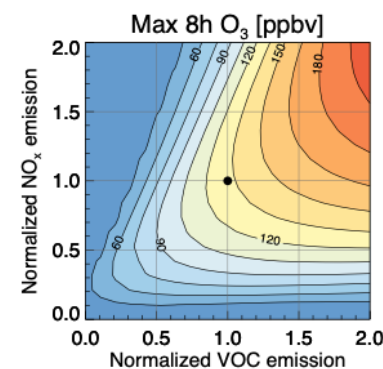
上海 (2020, 城市)



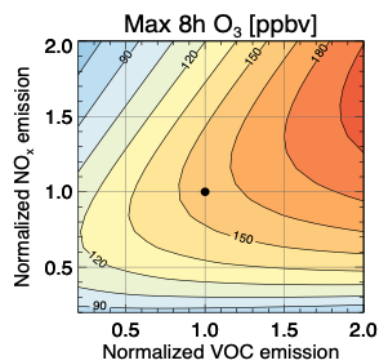
深圳 (2020, 城市)



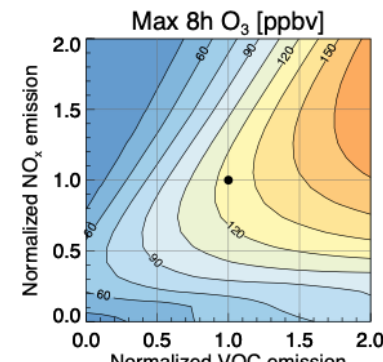
成都 (2019, 城市)



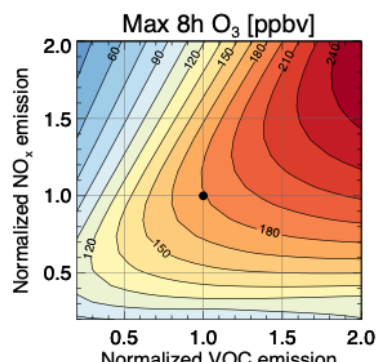
西安 (2018, 城市)



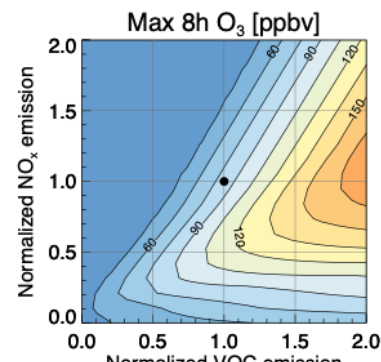
泰安 (2019, 郊区)



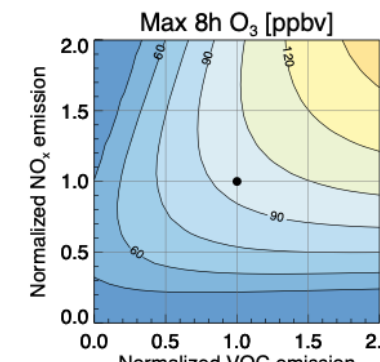
新津 (2019, 郊区)



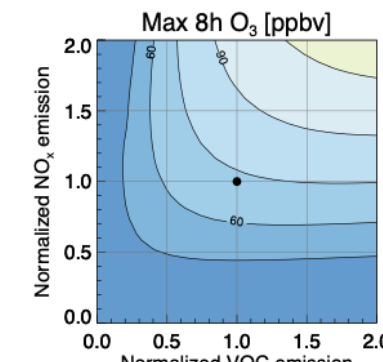
长三角 (2018, 区域)



珠三角 (2014, 区域)



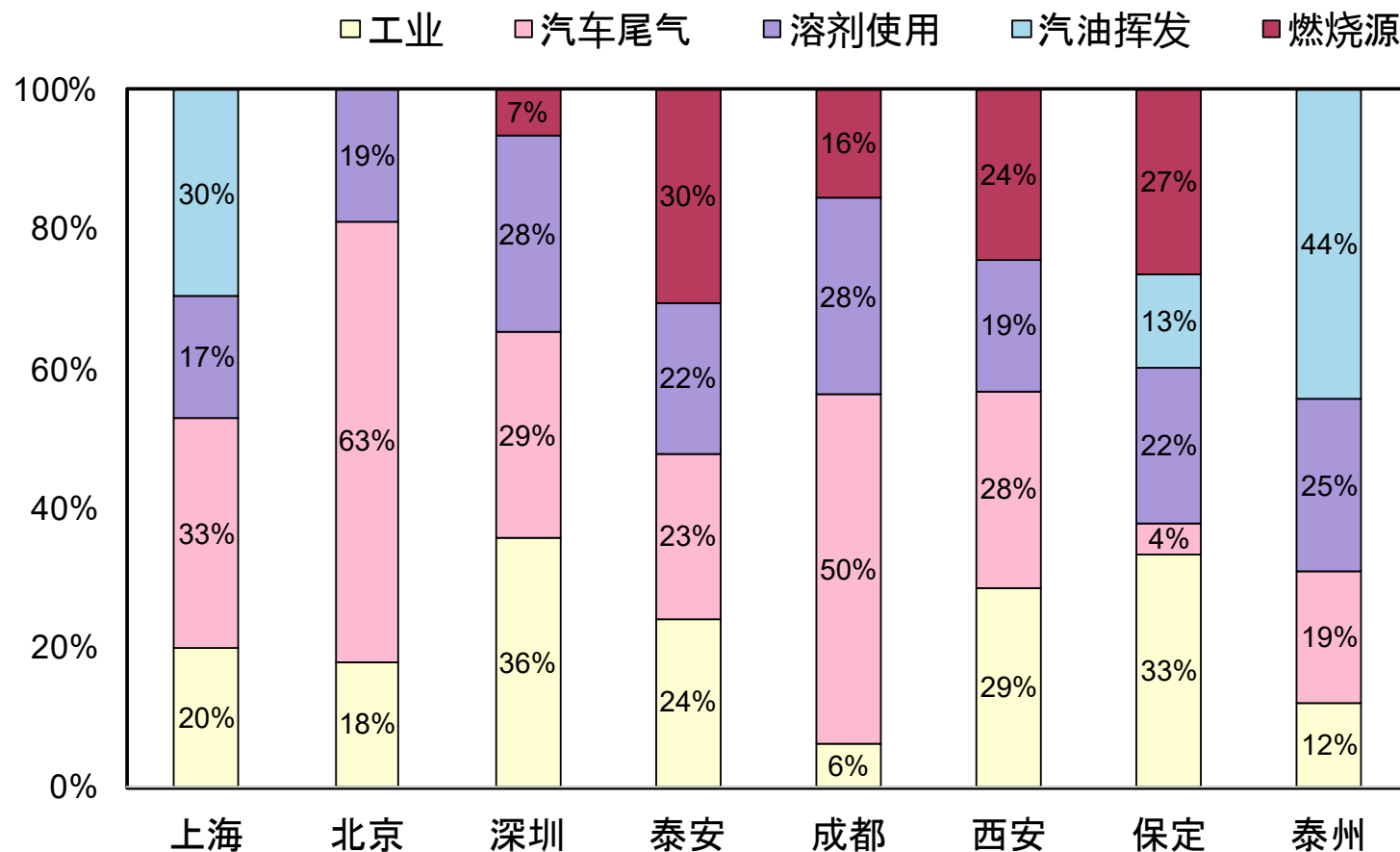
秦岭 (2018, 背景)



青神 (2019, 背景)

O₃污染成因与来源-关键排放源定量解析

□ O₃化学生成的重点人为源VOCs排放集中在机动车尾气、工业、溶剂使用等源类别。



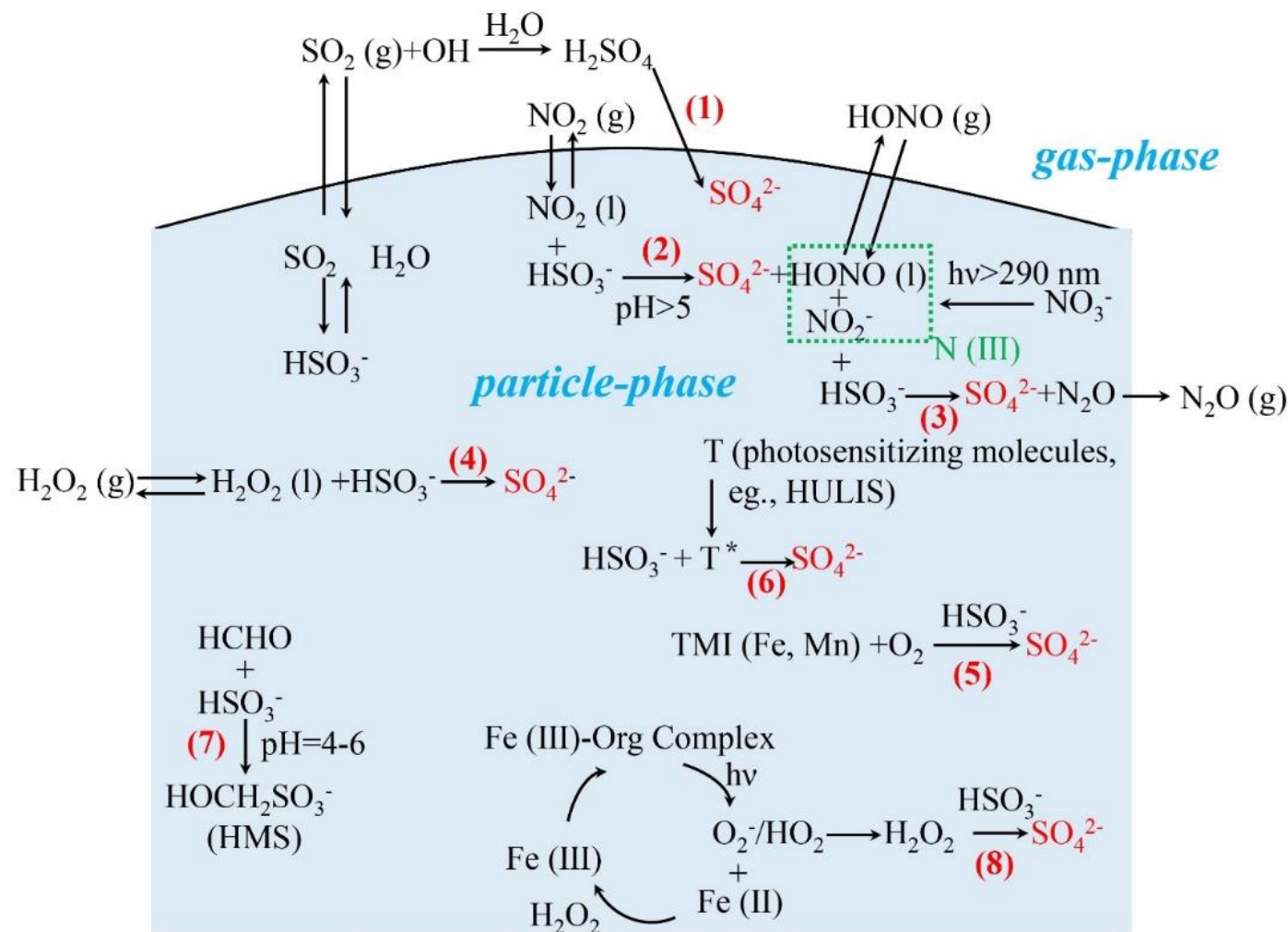
- 交通源和工业源是对局地O₃生成增量贡献最多的人为源VOCs排放源。交通源和工业源对北京O₃生成增量的贡献超过50%，上海超过70%

- 臭氧在城市群区域以VOCs控制为主，在NO_x深度减排背景下的VOCs防控是城市群区域近期解决夏季臭氧问题的关键措施
- VOCs排放的主要行业是机动车尾气、工业、溶剂使用
- 基于自由基来源分析表明，全国层面对活性含氮化合物（Nr）、含氧挥发性有机物（OVOCs）主要来源的集中管控对于区域臭氧污染防治可能具有较好的效果。

汇报提纲

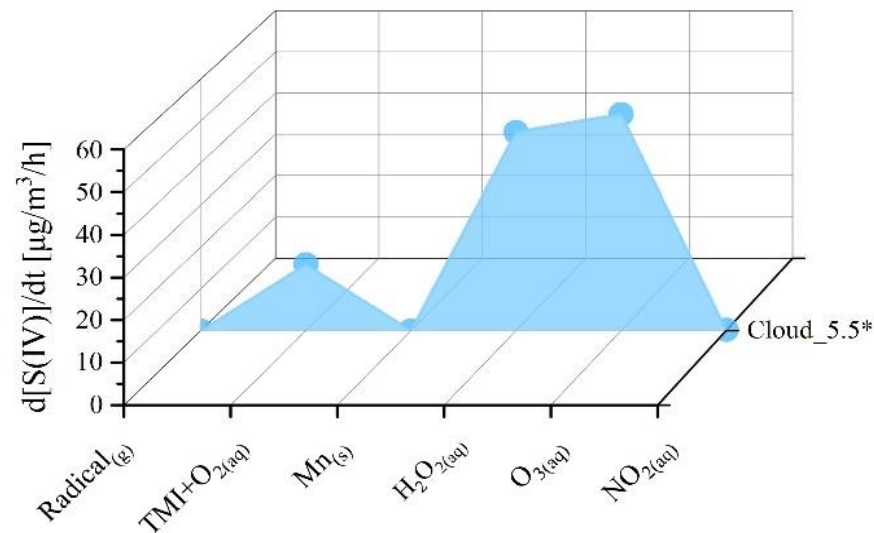
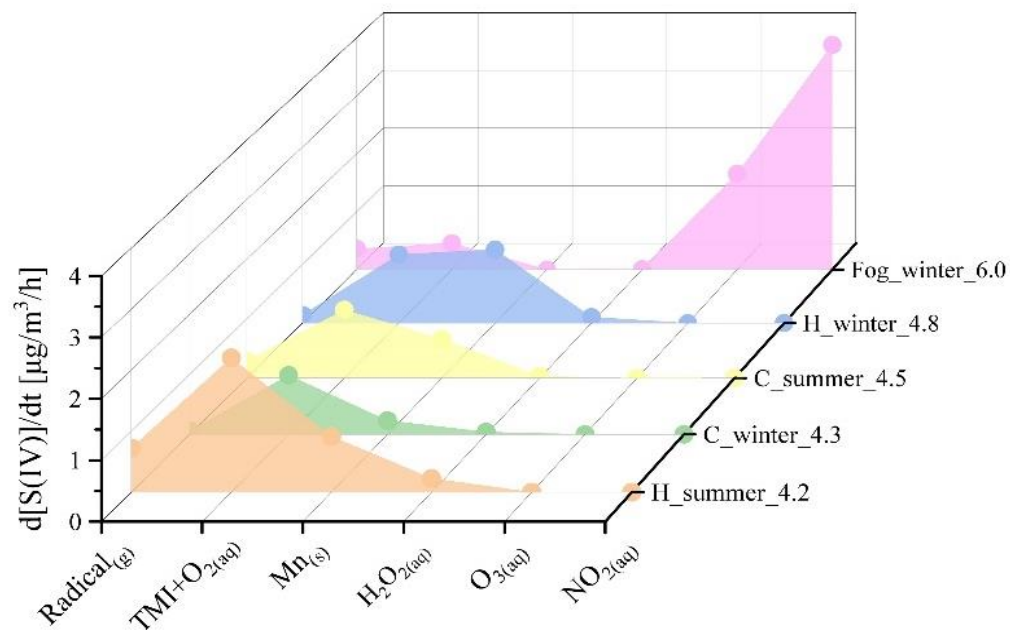
- 当前大气污染防治面临的新形势
- 臭氧污染成因剖析
- **二次颗粒物污染成因剖析**
- 臭氧和PM_{2.5}耦合机制剖析
- 国家层面总体调控策略思考

PM_{2.5}二次生成机制-硫酸盐产生机制汇总



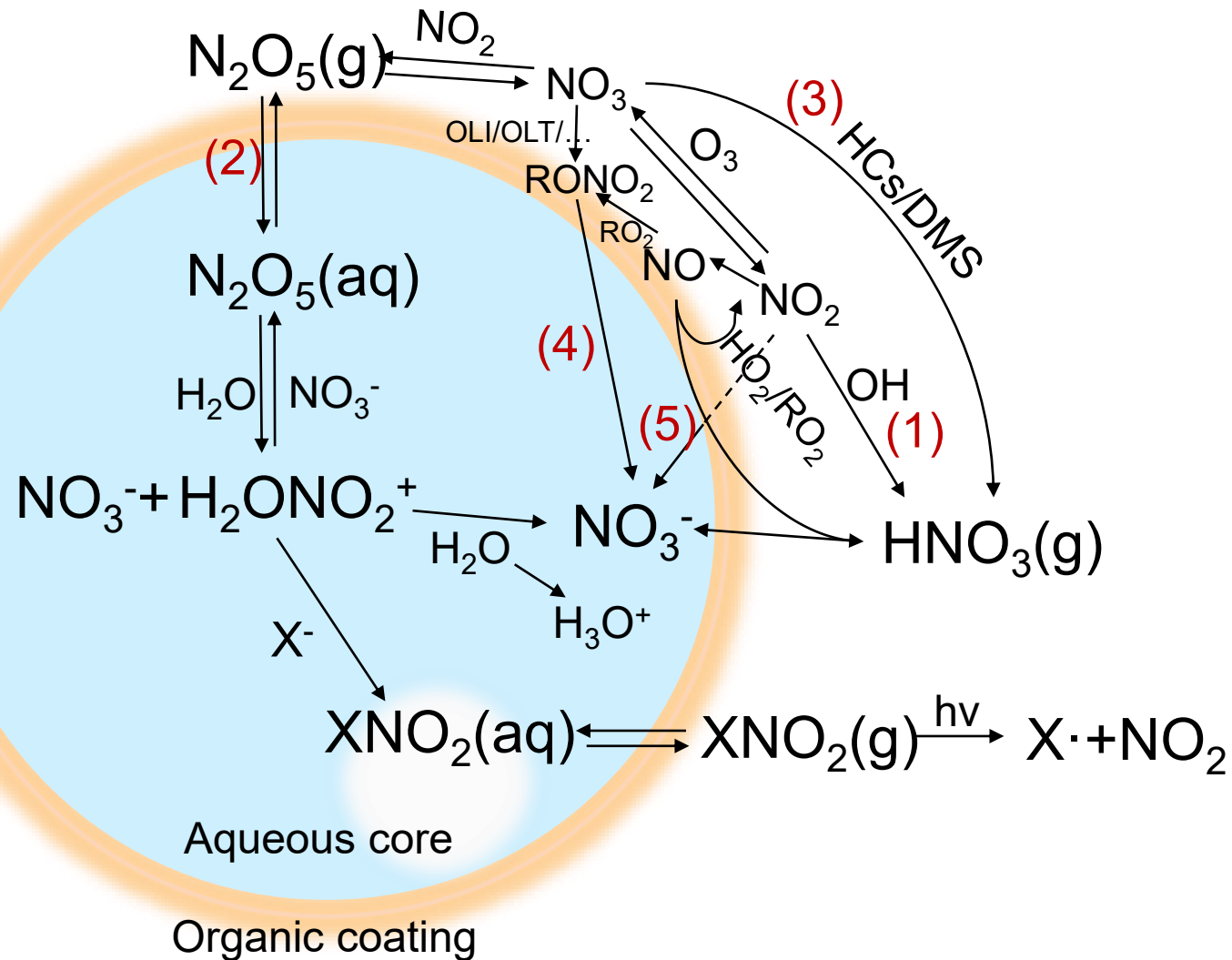
- H₂O₂相关氧化
- 过渡金属催化氧化
- 含氮物种氧化
- 光敏物质氧化
- HCHO氧化
- O₃氧化

典型条件下硫酸盐生成机制



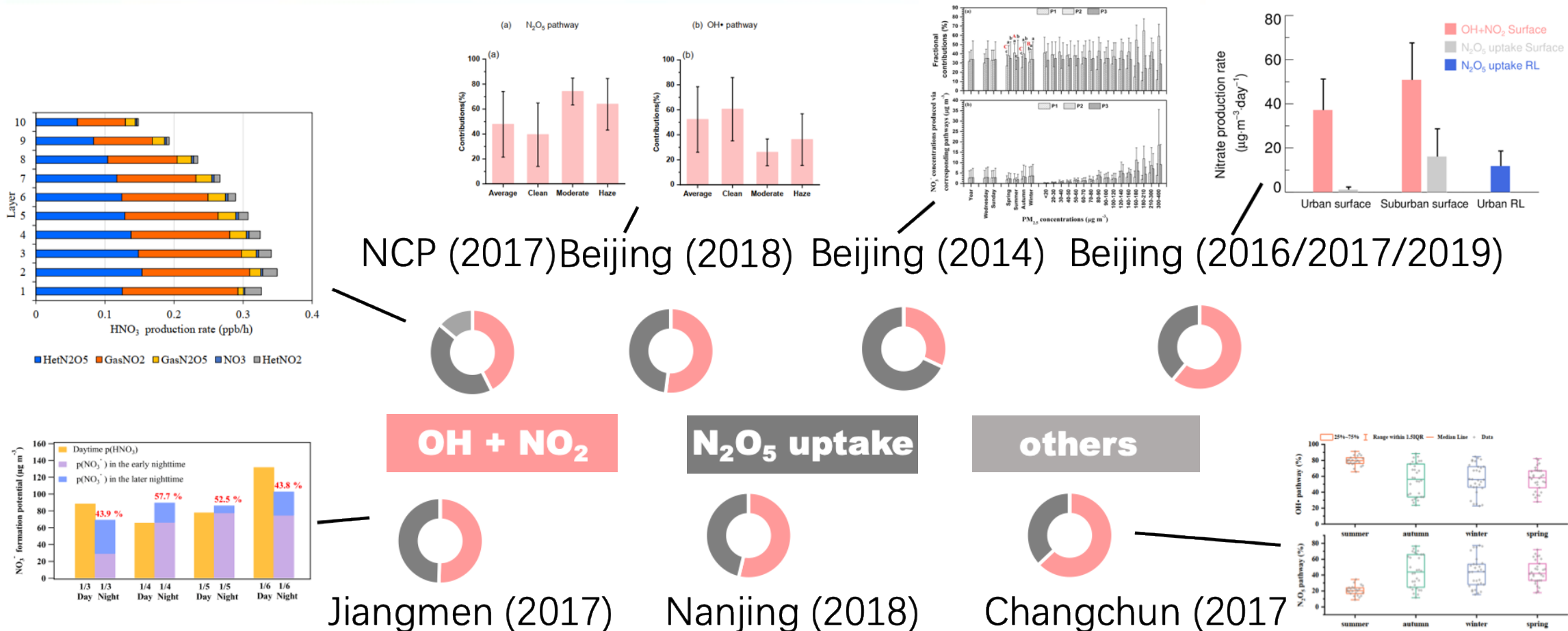
- 云：水含量极高(> 0.01 g/g)，海拔高，H₂O₂和O₃氧化为主；
- 雾：水含量高(> 0.001 g/g)，近地面，NO₂高，NO₂的氧化为主；
- 冬夏颗粒物污染：水含量中等（300 $\mu\text{g}/\text{g}$ >, >10 $\mu\text{g}/\text{g}$ ），H₂O₂和TMI氧化贡献主导。

PM_{2.5}二次生成机制-硝酸盐产生机制汇总



- (1) 气相OH自由基氧化
- (2) N₂O₅非均相摄取
- (3) 气相NO₃氧化
- (4) 有机硝酸RONO₂摄取
- (5) NO₂非均相摄取

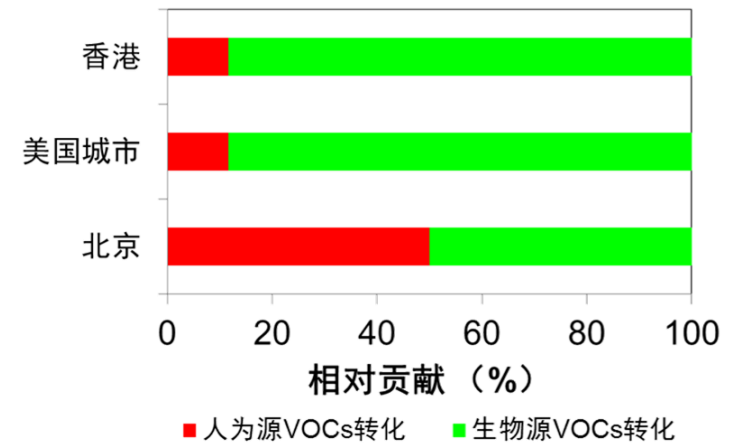
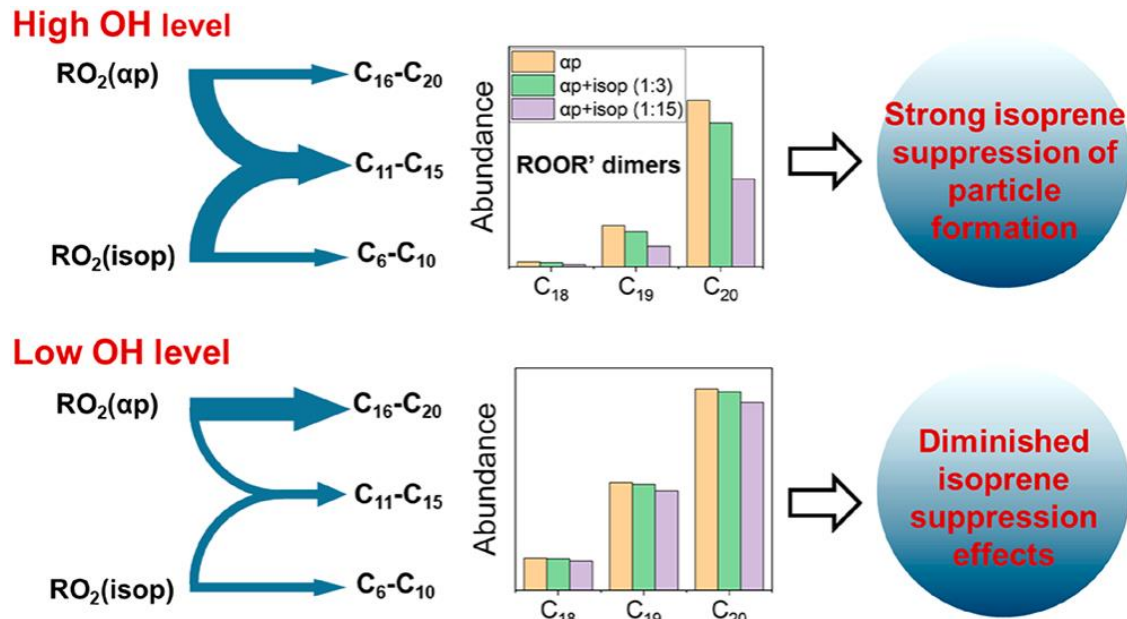
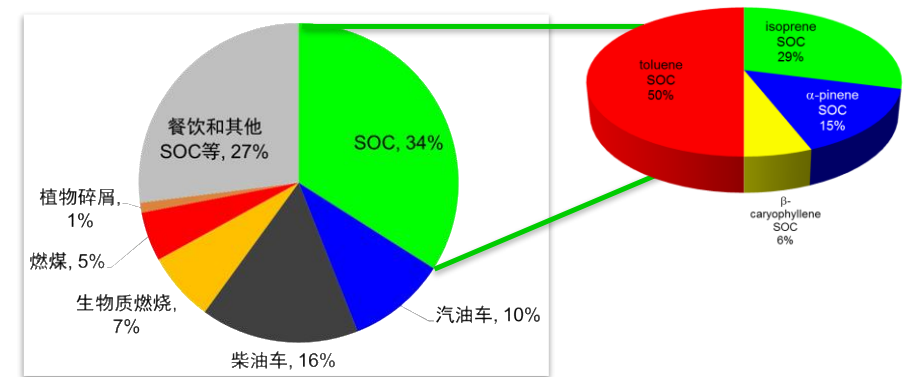
典型条件下硝酸盐生成机制



多数的观测和模式结果表明硝酸盐由日间OH氧化和夜间 N_2O_5 摄取共同主导，两者相对贡献大致均分，而部分观测发现由单一途径主导

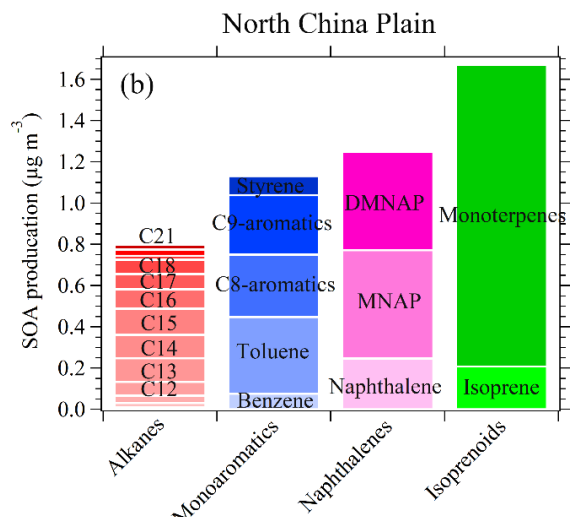
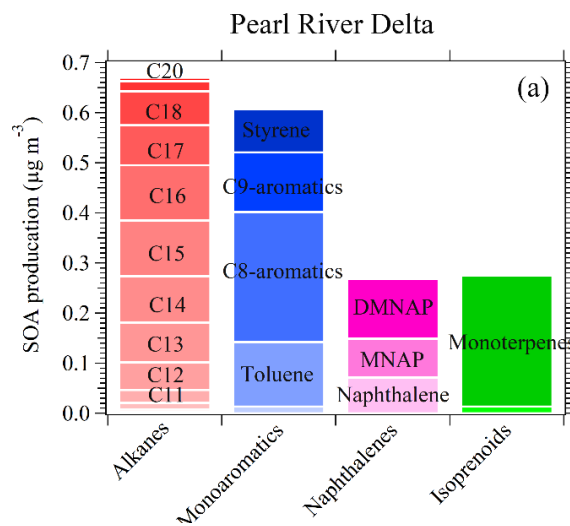
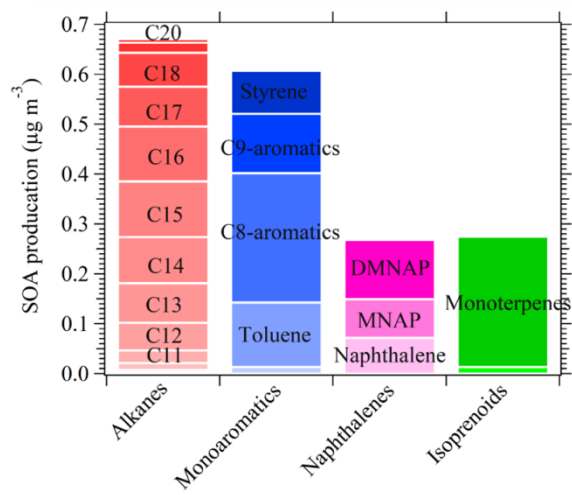
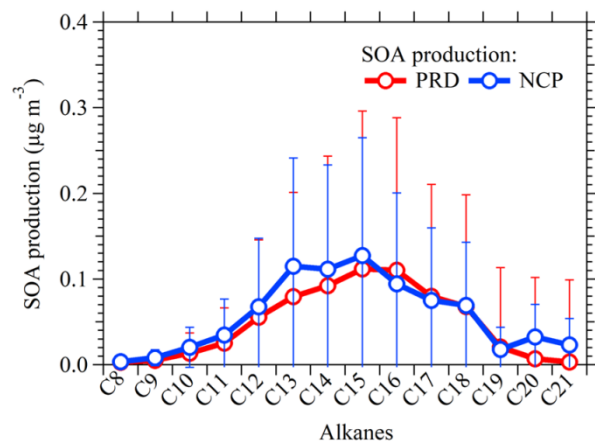
PM_{2.5}二次生成机制-SOA气相来源

- 我国SOA的前体物主要来自于人为源，包括**生物质燃烧、机动车尾气、汽油蒸发**。
- SOA的前体物的**天然来源**主要是倍半萜烯和异戊二烯，且生物源VOCs之间会相互作用，影响SOA的产率



PM_{2.5}二次生成机制-S/IVOCs气相氧化对SOA的贡献

□高碳烷烃和萘类等S/IVOCs对SOA的生成具有重要贡献，且贡献水平与传统的单环芳香烃相当



在实现了关键S/IVOCs物种的在线测量后；证实这些关键物种对SOA生成的贡献（与单环芳香烃相当）

- SO_2 得到有效控制后，典型城市地区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染的前体物基本相同，均为 NO_x 和VOCs，VOCs主要行业机动车尾气、溶剂使用、汽油挥发；
- 但， $\text{PM}_{2.5}$ 的前体物还包括一次排放、 NH_3 、S/IVOCs等；
- 以扬尘和 SO_2 控制为主的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治很成功，以 NO_x 和VOCs氧化产生的臭氧和二次 $\text{PM}_{2.5}$ 污染协同防治是目前的挑战。

汇报提纲

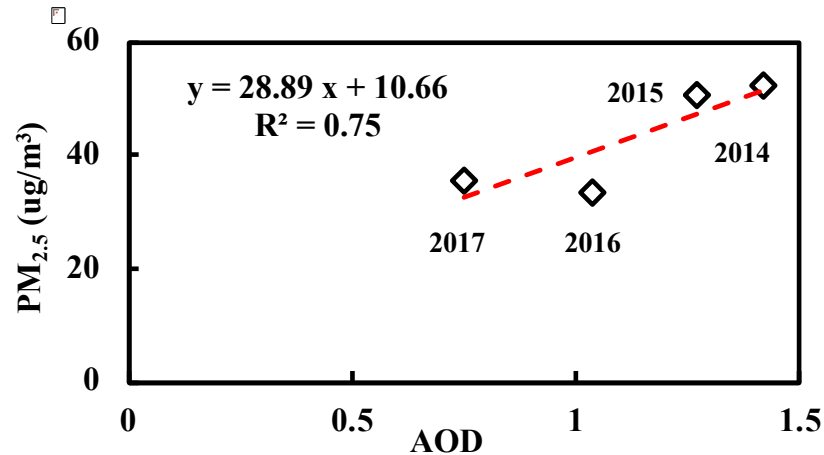
- 当前大气污染防治面临的新形势
- 臭氧污染成因剖析
- 二次颗粒物污染成因剖析
- **臭氧和PM_{2.5}耦合机制剖析**
- 国家层面总体调控策略思考

PM_{2.5}和O₃污染的相互影响- PM_{2.5}对太阳辐射的影响

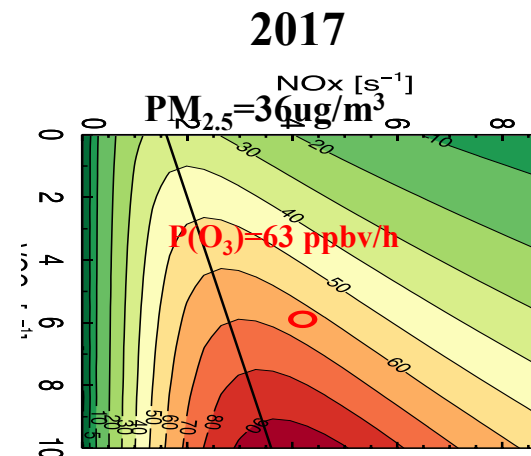
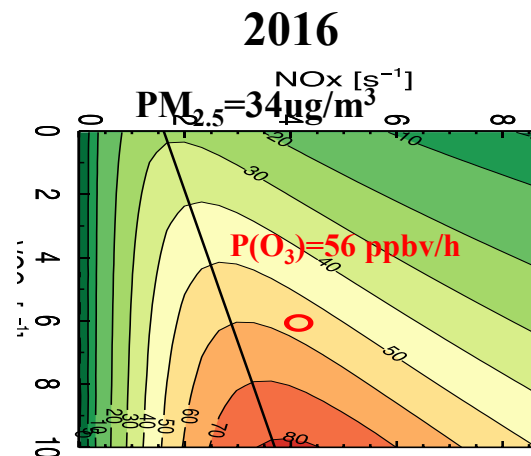
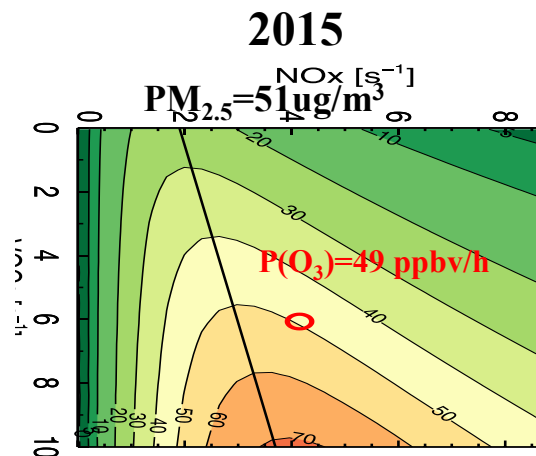
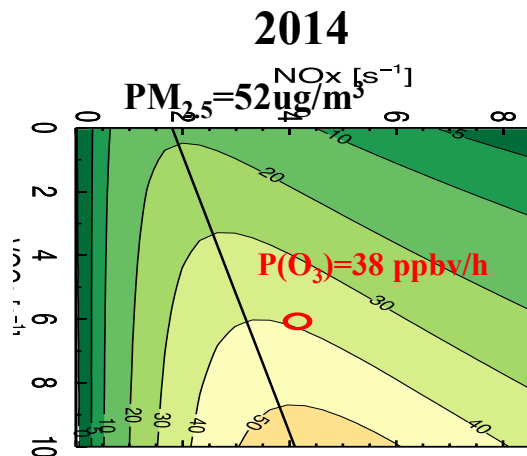
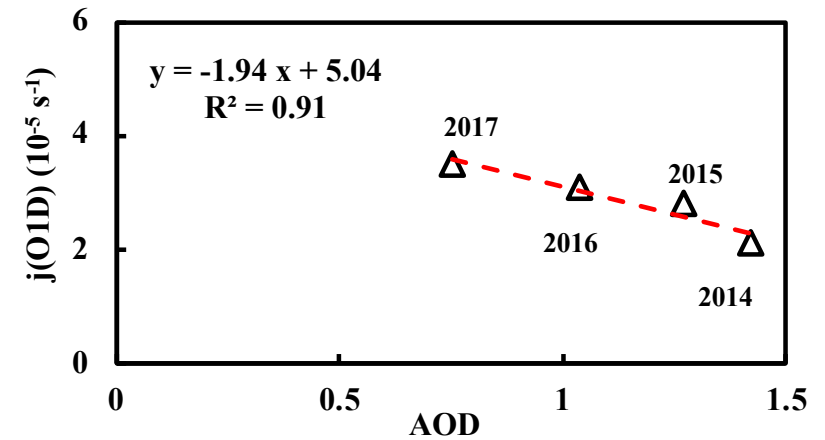
□ 现有研究集中在东部发达城市群，气溶胶对光解速率的减弱最高可达60%

location	time	j(NO ₂)	j(O ¹ D)	O ₃	reference	Model
China	2005		6-18%		Lou et al., 2014	GEOS-CHEM
Central Eastern China	2006		~50%		Li et al., 2011	NAQPMS
Eastern China	2000 W	10-30%	20-30%	2-4%	Tie et al., 2005	MOZART-2
	2000 S	5-20%	1-10%	< 2%		
Pearl River Delta	2006	~50% UV		28%	Deng et al., 2011	TUV + NCAR-MM
Guangzhou	2004	33%		22-34%P(O ₃)	Zhang et al., 2008	TUV + OBM
Yufa, Beijing	2006	~15%		~20%	Zhu et al., 2017	TUV + OBM
Xi'an	2013	0-60%		5-50 ug/m ³	Feng et la., 2016	WRF/Chem
Beijing	2003	27%			Xu. 2006	CMAQ-MADRID

PM_{2.5}和O₃污染的相互影响- PM_{2.5}对太阳辐射的影响



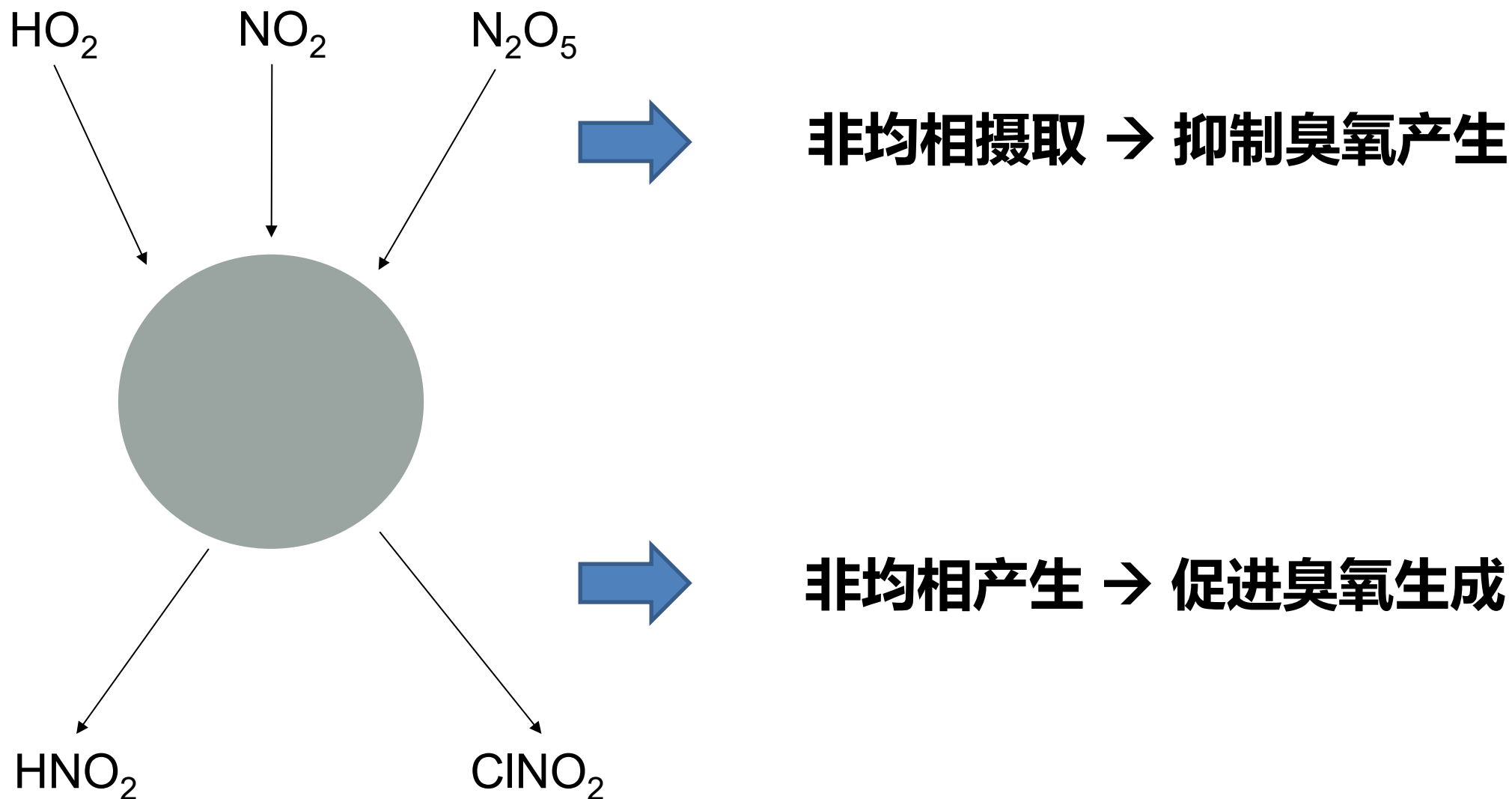
京津冀区域



$$\frac{k_{\text{NO}_x}}{k_{\text{VOC}_s}} \approx 1:5$$

颗粒物浓度的减少伴随着局地臭氧生成速率的增强，但控制区没有发生显著变化

PM_{2.5}和O₃污染的相互影响- PM_{2.5}对表面反应的影响



HO₂ 非均相摄取对O₃生成的影响

哈佛大学&南信大团队研究成果

Anthropogenic drivers of 2013–2017 trends in summer surface ozone in China

Ke Li^{a,b}, Daniel J. Jacob^{b,1}, Hong Liao^{a,c,1}, Lu Shen^b, Qiang Zhang^d, and Kelvin H. Bates^b

^aHarvard–NUIST Joint Laboratory for Air Quality and Climate, Nanjing University of Information Science and Technology, 210044 Nanjing, China; ^bJohn A. Paulson School of Engineering and Applied Sciences, Harvard University, Cambridge, MA 02138; ^cJiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, 210044 Nanjing, China; and ^dDepartment of Earth System Science, Tsinghua University, 100084 Beijing, China

Edited by John H. Seinfeld, California Institute of Technology, Pasadena, CA, and approved December 4, 2018 (received for review July 15, 2018)

nature
geoscience

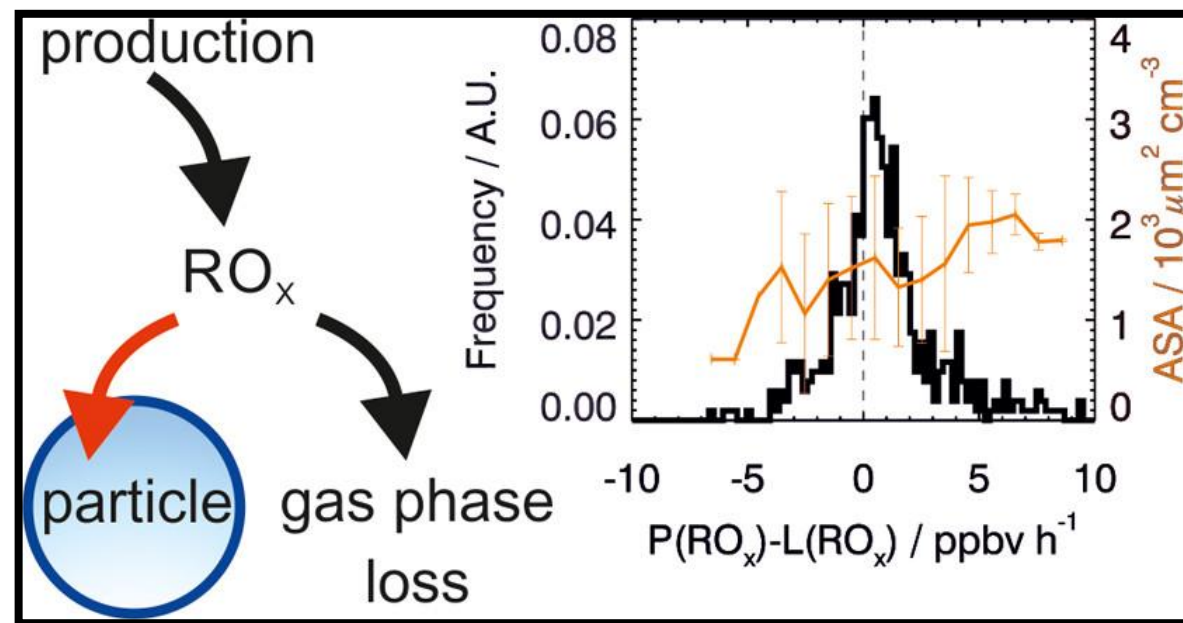
ARTICLES

<https://doi.org/10.1038/s41561-019-0464-x>

A two-pollutant strategy for improving ozone and particulate air quality in China

Ke Li^{1,2}, Daniel J. Jacob^{2*}, Hong Liao^{3*}, Jia Zhu³, Viral Shah², Lu Shen², Kelvin H. Bates², Qiang Zhang⁴ and Shixian Zhai²

北大团队研究成果



Tan et al., *ES&T*, 2020

Song et al. *ES&T*, 2022

- 哈佛大学&南信大团队基于GEOS-CHEM模型推断近年来臭氧浓度升高主要由于颗粒物浓度下降减弱了非均相摄取，但其结果高度依赖于单一系数的设定，**HO₂摄取系数为0.2→缺乏观测数据支持**
- 北大团队基于自由基观测实验发现非均相摄取系数仅为0.1±0.13→**改变未来颗粒物持续下降的臭氧趋势判断**

HO₂ 非均相摄取对O₃生成的影响

ARTICLES

<https://doi.org/10.1038/s41561-022-00972-9>

nature
geoscience



OPEN

Suppression of surface ozone by an aerosol-inhibited photochemical ozone regime

Peter D. Ivatt^{1,2}, Mathew J. Evans^{1,2}✉ and Alastair C. Lewis^{1,2}

Atmospheric ozone (O₃) is a pollutant produced through chemical chain reactions where volatile organic compounds (VOCs), carbon monoxide and methane are oxidized in the presence of oxides of nitrogen (NO_x). For decades, the controlling chain termination step has been used to separate regions into either 'NO_x limited' (peroxyl-radical self-reactions dominate) or 'VOC limited' (hydroxyl radical (OH) + nitrogen dioxide (NO₂) reaction dominates). The controlling regime would then guide policies for reducing emissions and so O₃ concentrations. Using a chemical transport model, we show that a third 'aerosol inhibited' regime exists, where reactive uptake of hydroperoxyl radicals (HO₂) onto aerosol particles dominates. In 1970, 2% of the Northern Hemisphere population lived in an aerosol-inhibited regime, but by 2014 this had increased to 21%; 60% more than lived in a VOC-limited regime. Aerosol-inhibited chemistry suppressed surface O₃ concentrations in North America and Europe in the 1970s and is currently suppressing surface O₃ over Asia. This third photochemical O₃ regime leads to potential trade-off tensions between reducing particle pollution in Asia (a key current health policy and priority) and increasing surface O₃, should O₃ precursors emissions not be reduced in tandem.

NO_x控制

VOCs控制

气溶胶控制

(aerosol-inhibited)

[基于PKU参数化方
程 (Song et al.,
2020)]

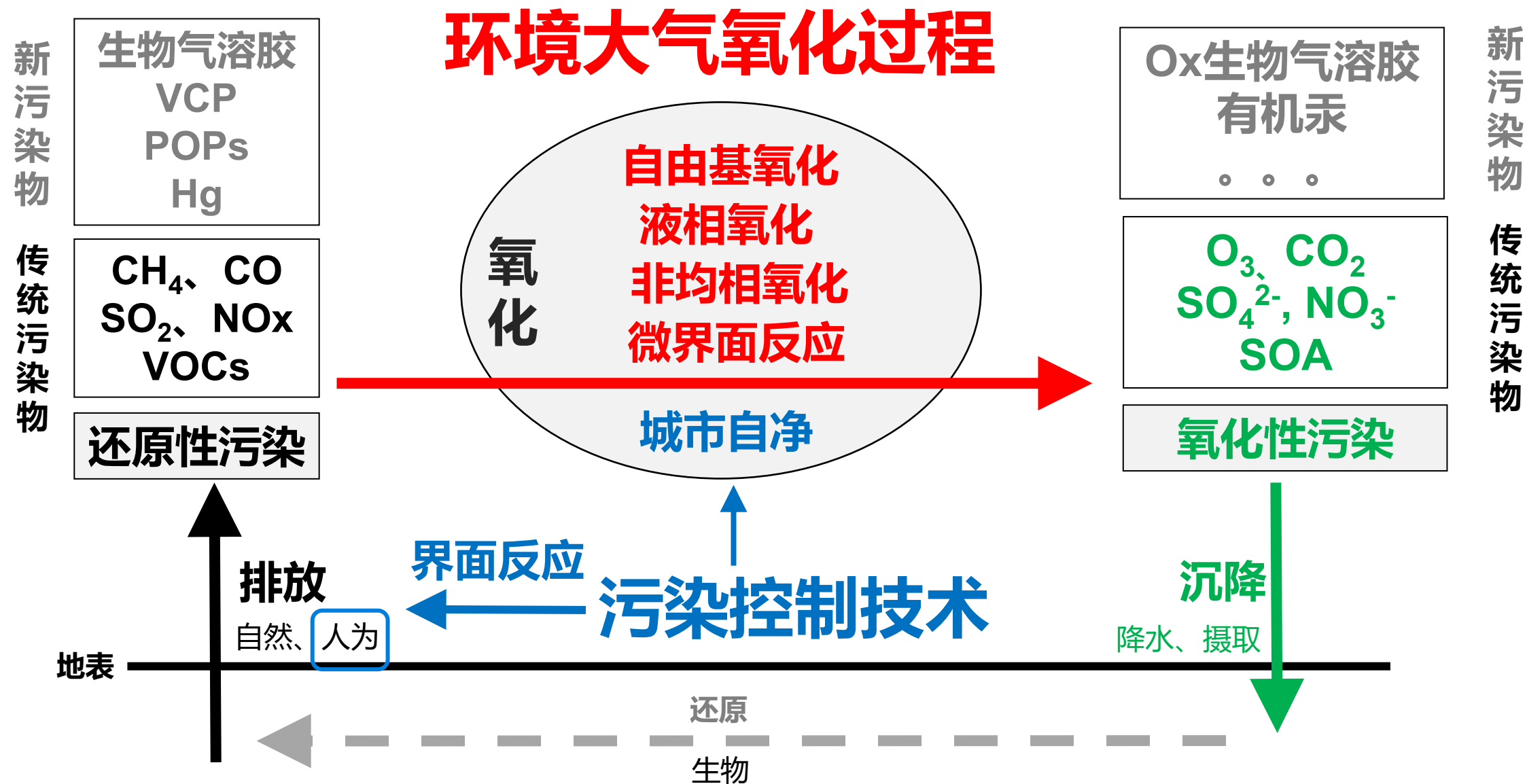
- O_3 和 $PM_{2.5}$ 污染现阶段防治不协同的部分主要在于：

颗粒物的非均相反反应和消光作用复杂，颗粒物的下降可能导致了更多臭氧的产生，但其中部分关键过程、关键参数和主导因子亟待厘清。

汇报提纲

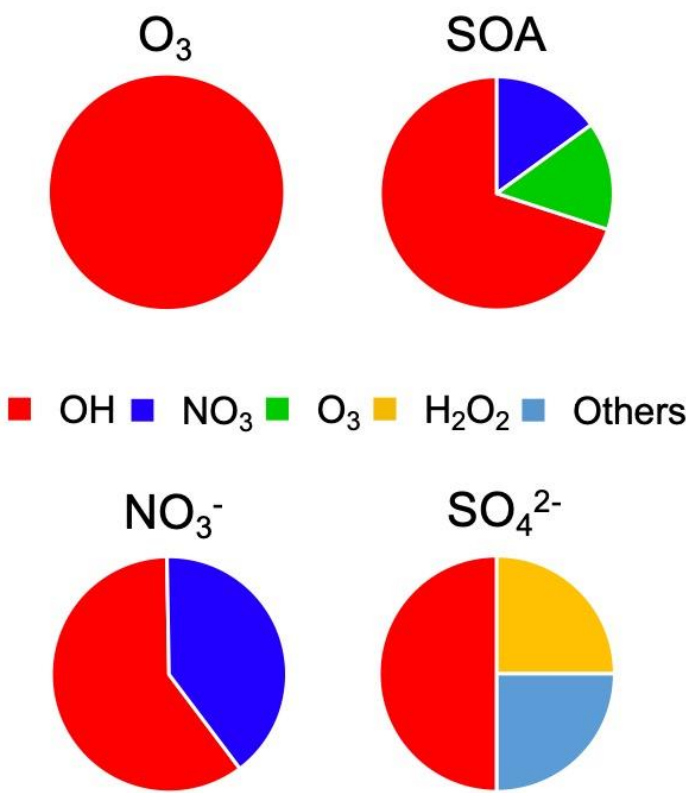
- 当前大气污染防治面临的新形势
- 臭氧污染成因剖析
- 二次颗粒物污染成因剖析
- 臭氧和PM_{2.5}耦合机制剖析
- **国家层面总体调控策略思考**

大气氧化过程调控是O₃和PM_{2.5}污染协同防控的关键



大气氧化性的定量表征和调控是当前国际科学前沿

城市群尺度：O₃和PM_{2.5}协同控制

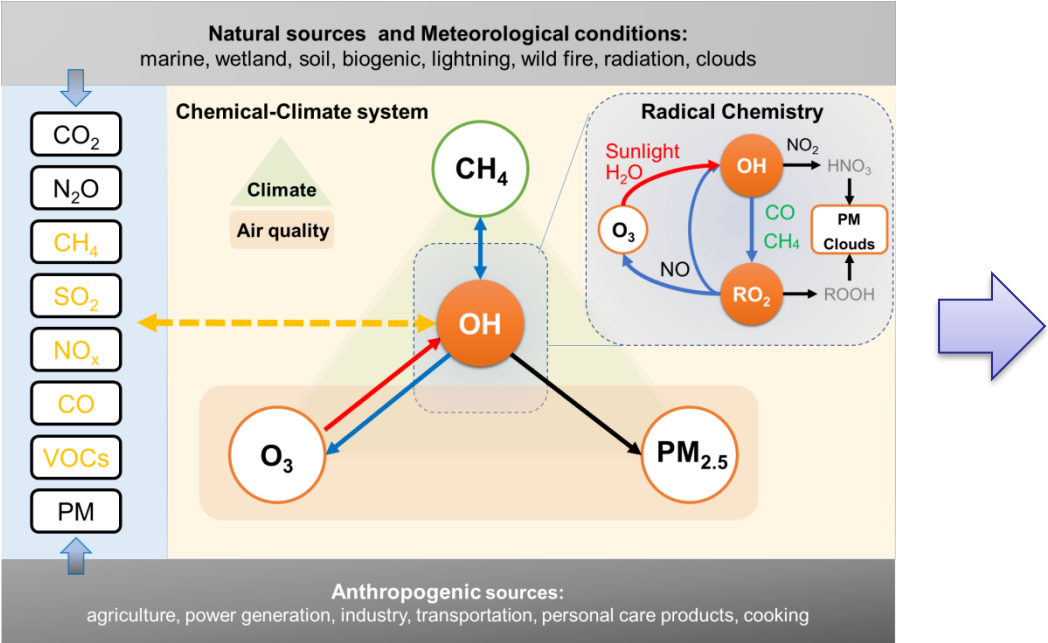


全球尺度：污染和气候变化协同

物种	全球化学寿命	去除占比 (%)		
		OH	O ₃	NO ₃
CO	1-2 月	85	-	-
H ₂	2 年	25	-	-
CH ₄	8 年	90	-	-
异戊二烯	小时	80	7	13
SO ₂	天	30	-	-
NO _x	0.3-5 天	50	40	-
萜烯	小时	20	25	55
C ₂ H ₆	2 月	80	-	-
N ₂ O	120 年	-	-	-
(CH ₃) ₂ S	天	70	-	30

全球-区域-城市不同尺度大气氧化性表达式

从污染应对和自净能力角度，初步提出了跨尺度大气氧化性科学内涵与简化指标：



适用范围	类型	氧化性指标	
城市-区域尺度	二次污染物生成速率	P(臭氧)、P(硝酸盐)、P(硫酸盐)、P(SOA)、...	
区域尺度	大气自由基反应速率	$AOC=[OH]\times k_{OH}+[O_3]\times k_{O_3}+[NO_3]\times k_{NO_3}+多相反应+...$	气相+多相过程
		$AOC=[OH]\times k_{OH}+[O_3]\times k_{O_3}+[NO_3]\times k_{NO_3}$	气相过程
		$AOC=[OH]\times k_{OH}$	日间过程
		$AOC=[O_3]\times k_{O_3}+[NO_3]\times k_{NO_3}+V_{N_2O_5+aerosol}$	夜间过程
全球尺度	自由基	OH浓度	

全球-区域-城市不同尺度大气氧化性主控因子

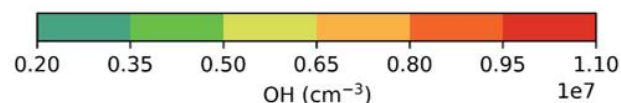
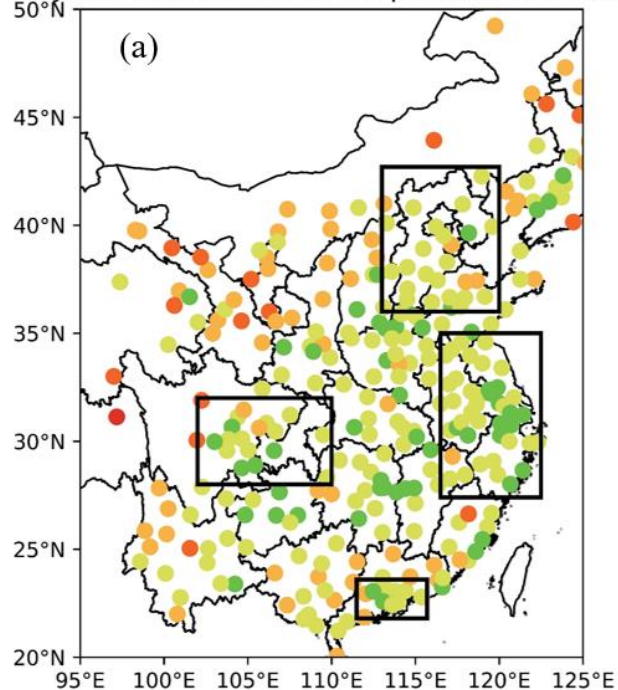
初步提出了不同尺度大气氧化性简化表达式及主控因子：

适用范围	类型	氧化性指标及表达式		主控因子
城市-区域 尺度	二次污染 物生成速 率	$P(O_3) = k \times [HO_2 + RO_2] \times NO$ $= P(RO_x) \times (R_{VOC}/R_{NOx}) \times \varphi_{O_3}$		VOCs、NOx、P(ROx)
		$P(pNO_3^-) = f_{par}(k[OH][NO_2] + \frac{1}{4}C_{N_2O_5}\gamma_{N_2O_5}[Sa][N_2O_5])$ $= f_{par}(P(RO_x) \times \frac{LN}{Q} + P(O_3) \times \varphi_{pNO_3^-})$		VOCs、NOx、P(O ₃)、 P(ROx)
		$P(SO_4^{2-}) = f_0(SO_2) \times f_1(RH) \times f_2(pH) \times f_3(IS)$ $\times f_4(TMI \text{ Or } C) \times f_5(OH) \times f_6(HO_2) \times f_7(H_2O_2) \times f_8(O_2^-)$		VOCs、NOx、P(ROx)
区域尺度	大气自由 基反应速 率	白天过程	$AOC=[OH] \times k_{OH}$	P(ROx)
		白天过程	$AOC=[O_3] \times k_{O_3} + [NO_3] \times k_{NO_3} + V_{N_2O_5+aerosol}$	P(O ₃)、P(ROx)
全球尺度	自由基	OH浓度		P(ROx)

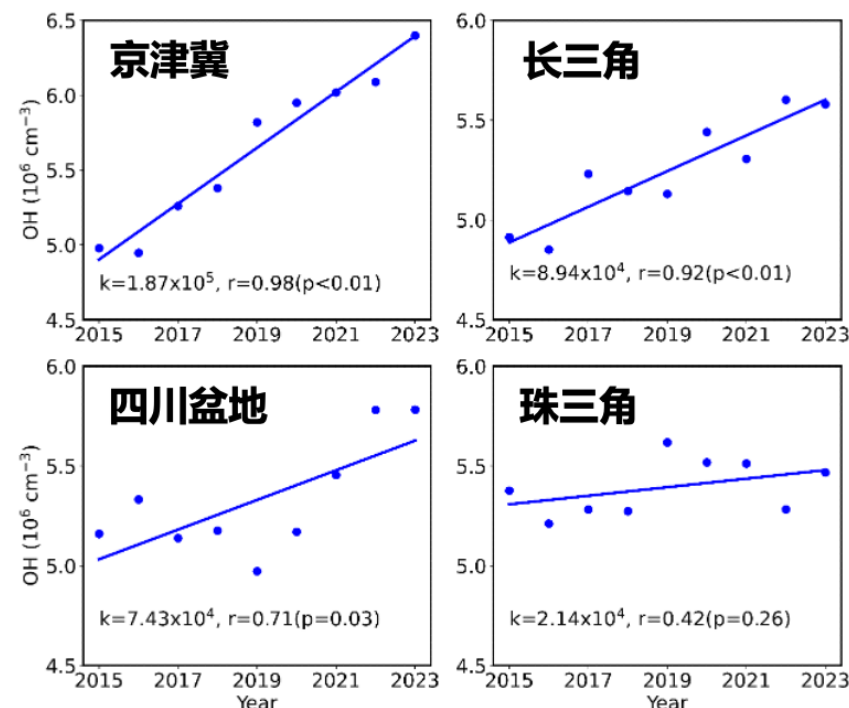
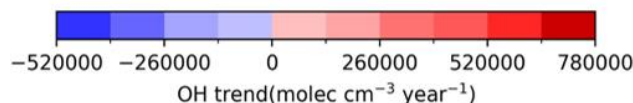
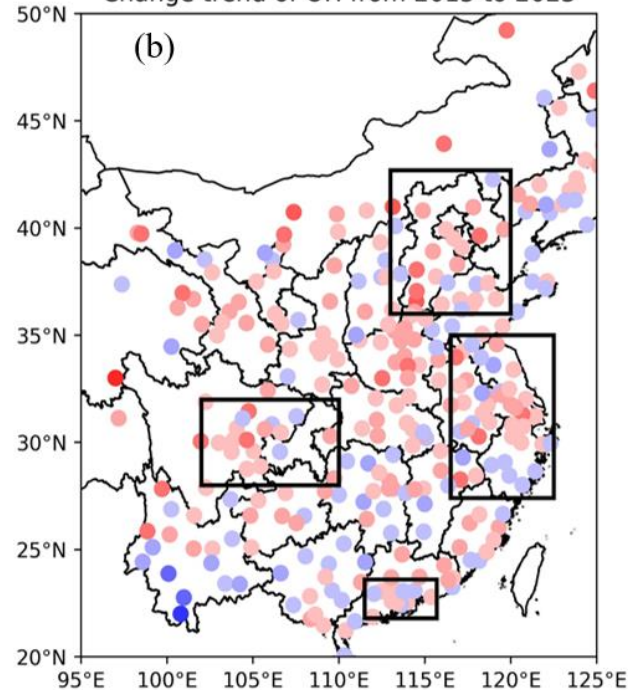
当前防控策略显著增强了全国大气氧化性

基于观测大气组分浓度，估算了我国重点区域的日间OH自由基浓度

Daytime values of OH for the period of 2015-2023



Change trend of OH from 2015 to 2023



2015年以来，京津冀、长三角、珠三角和成渝地区日间OH浓度总体呈现增加趋势

国家重点研发计划：大气氧化性项目

关键科学问题

大气氧化性演变规律与
大气自净能力驱动机制

科学问题分解

问题3 ➡ 决策支撑

大气氧化性调控原理
与调控的技术方案



调控方案
多目标协同

问题2 ➡ 定量解析

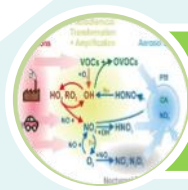
大气氧化性和自净能
力演变的量化表征



模型方法
多元数据融合

问题1 ➡ 机制研究

大气自由基来源
与转化新机制



理论基础
闭合实验

总体目标

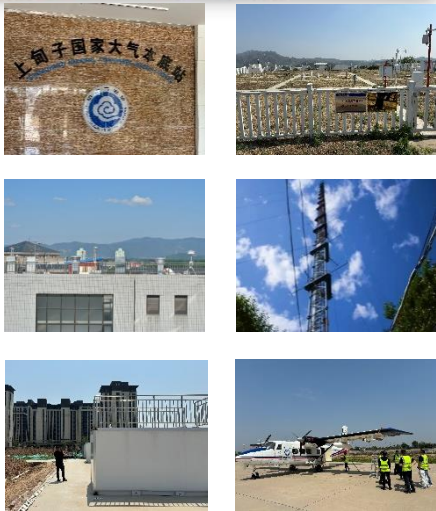
发展大气自由基化学闭合研究技术体系，厘清大气复合污染条件下的自由基反应新机制，构建通用性的对流层大气化学机制，在分子水平上厘清我国重点区域大气氧化性和自净能力的构成、来源和调控原理，提出“国家-区域-城市”尺度的调控方案。

关键技术：大气自由基闭环观测技术和“闭环观测-动力学模拟-模式模拟”全链条精细化闭合研究方法

全球范围首次开展多个站点同步的全谱系大气自由基观测

以京津冀为主要研究对象，在3个典型站点，开展4季地面-边界层协同的自由基化学闭环综合观测，观测参数覆盖自由基的来源、循环和去除全过程

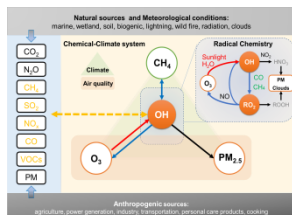
观测时间：2024年秋、冬和2025年春、夏



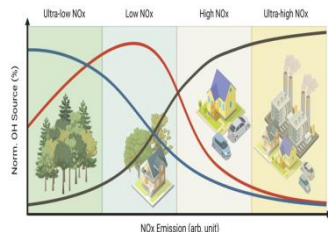
		仪器	参数
基础气象参数		地面气象	风温湿压
		光谱光度计	光化辐射通量
自由基化学 核心参数	自由基	LIF	OH, HO ₂ , RO ₂
		PERCA	RO ₂ +HO ₂
		PTR3	物种化RO ₂
		CEAS	NO ₃
		CIMS	Cl等
		CEAS	ClO, BrO, IO
	来源	LOPAP	HONO
		Hanstzch	HCHO
		CIMS	CINO ₂ , Cl ₂ 等
		Thermo系列	O ₃ , NO ₂
		CEAS	CHOCHO, CH ₃ COCHO
	循环	CEAS	N ₂ O ₅
		Thermo系列	NO, CO, SO ₂ , NOy
		GC-MS	VOCs
		PTR-ToF-MS	VOCs, OVOCs
	去除	LP-LIF	k _{OH}
		CEAS	k _{NO3} , γ _{N2O5}
		GC-ECD	PAN, PPN
TH, Thermo		PM _{2.5} , PM ₁₀ 质量浓度	
SMPS		3-500nm颗粒物数浓度	
	APS	500nm-10um颗粒物数浓度	

发起对流层大气氧化性观测实验计划

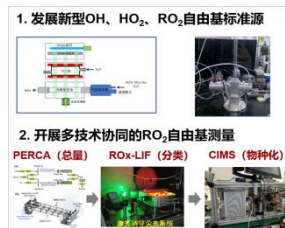
理论基础



研究现状



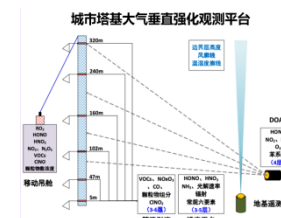
研究平台



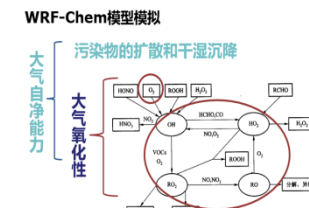
地面观测



垂直观测



模式模拟



大气氧化性的
科学内涵

测量方法

时空演变

对大气污染和
气候变化的影响

森林大气
背景大气

边界层大气

复合污染大气

大气氧化性闭
环观测平台

可覆盖“秒-
分钟-小时-天”
模拟研究平台

三种类型观测站：
区域
城市
背景

比对实验：
OH、HO₂、RO₂
NO₃、N₂O₅
HONO等

铁塔和移动吊
舱垂直观测

地基遥测

系留气艇观测

飞机航测与移
动观测

区域空气
质量模型

全球大气
化学模型

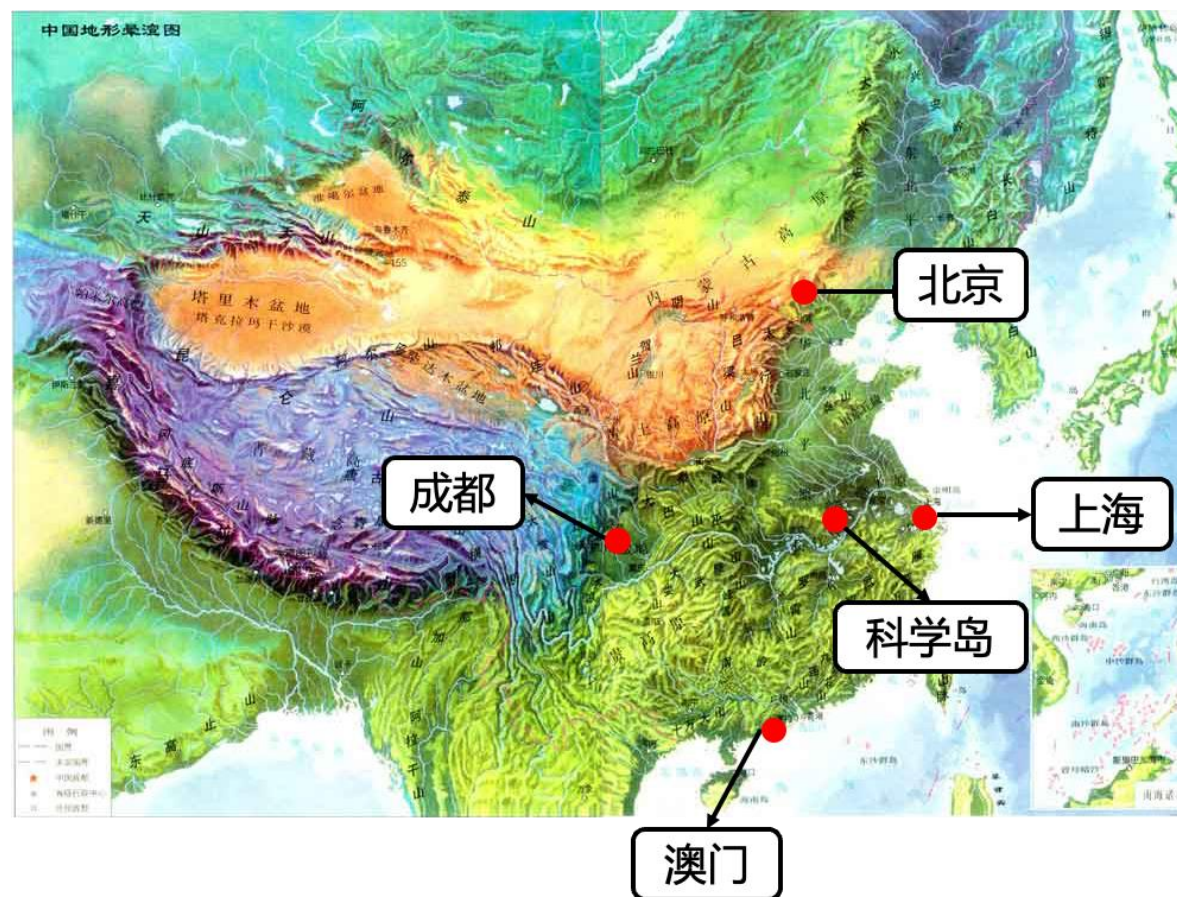
新方法
新数据
新机制
新理论

大气自由基研究联盟近期工作重点

1. 推动实现大气OH、NO₃、ROx和CINxOy自由基的长期定点观测

推动在**北大超站**、**合肥科学岛**、**上海环科院**、**澳门国家站**、**成都天府龙泉站**等若干代表性站点开展大气自由基的长期观测。

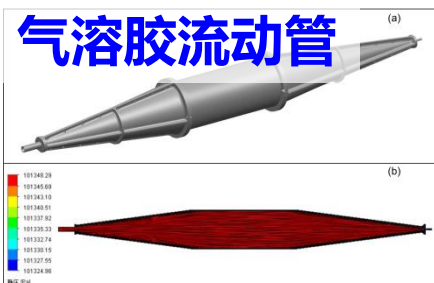
建设**通用型大气自由基标准源**和**大气自由基化学科学数据中心**。



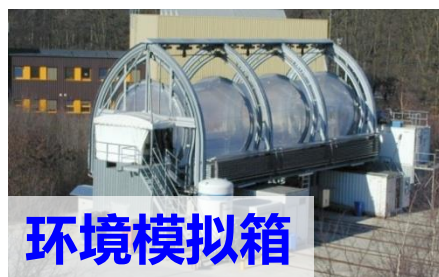
大气自由基研究联盟近期工作重点

2、组织中国版的大气（自由基）化学反应动力参数数据库建设

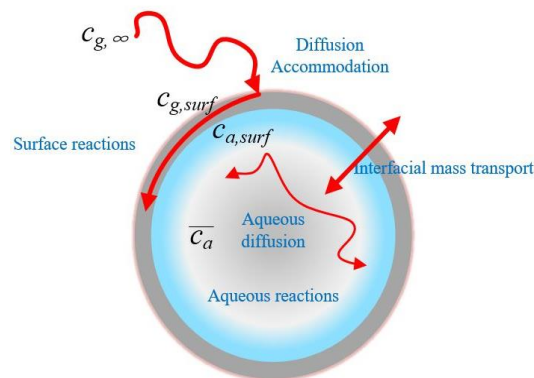
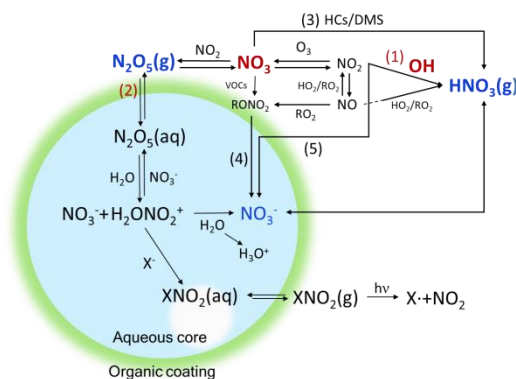
动力学参数测量



均相 ↔ 非均相



反应机理完善



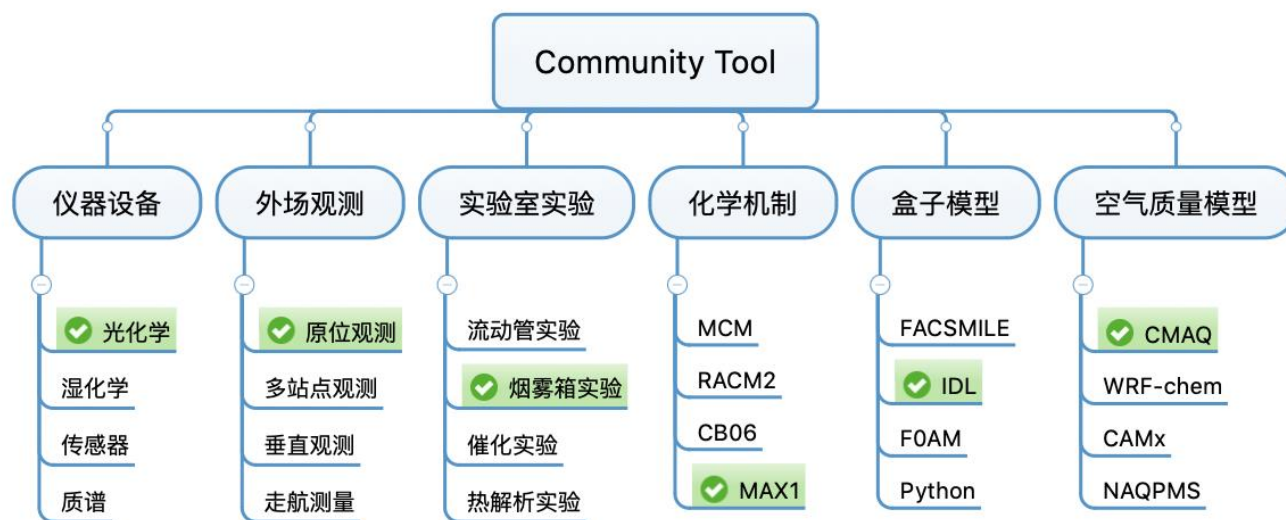
数据库发布



大气自由基研究联盟近期工作重点

3、通用型大气化学反应机制MAX系列研发与光化学盒子模型社区建设

建设**大气自由基化学的中文工具社区**，实现国产大气自由基化学机制的系统迭代升级，与大气污染成因解析工具包的集成化研发和应用。



The screenshot displays two web pages. The top page is the Master Chemical Mechanism (MCM) v3.3.1 website, which is part of the IUPAC International Union of Pure and Applied Chemistry. It features a navigation bar with links like 'WHO WE ARE', 'WHAT WE DO', 'EVENTS', 'PROJECTS', and 'NEWS'. The main content area lists 'WHAT WE DO' (Nomenclature, Digital Standards, Recommendations and Technical Reports, Journals) and 'DATABASES' (Agrochemicals). The bottom page is the FOAM Box Model website, which describes the Framework for 0-D Atmospheric Modeling (FOAM) as a MATLAB program for simulating atmospheric chemistry systems. It includes a list of applications, such as analysis of laboratory chamber experiments and interpretation of field observations, and mentions that FOAM is open-source and freely available for download on GitHub.

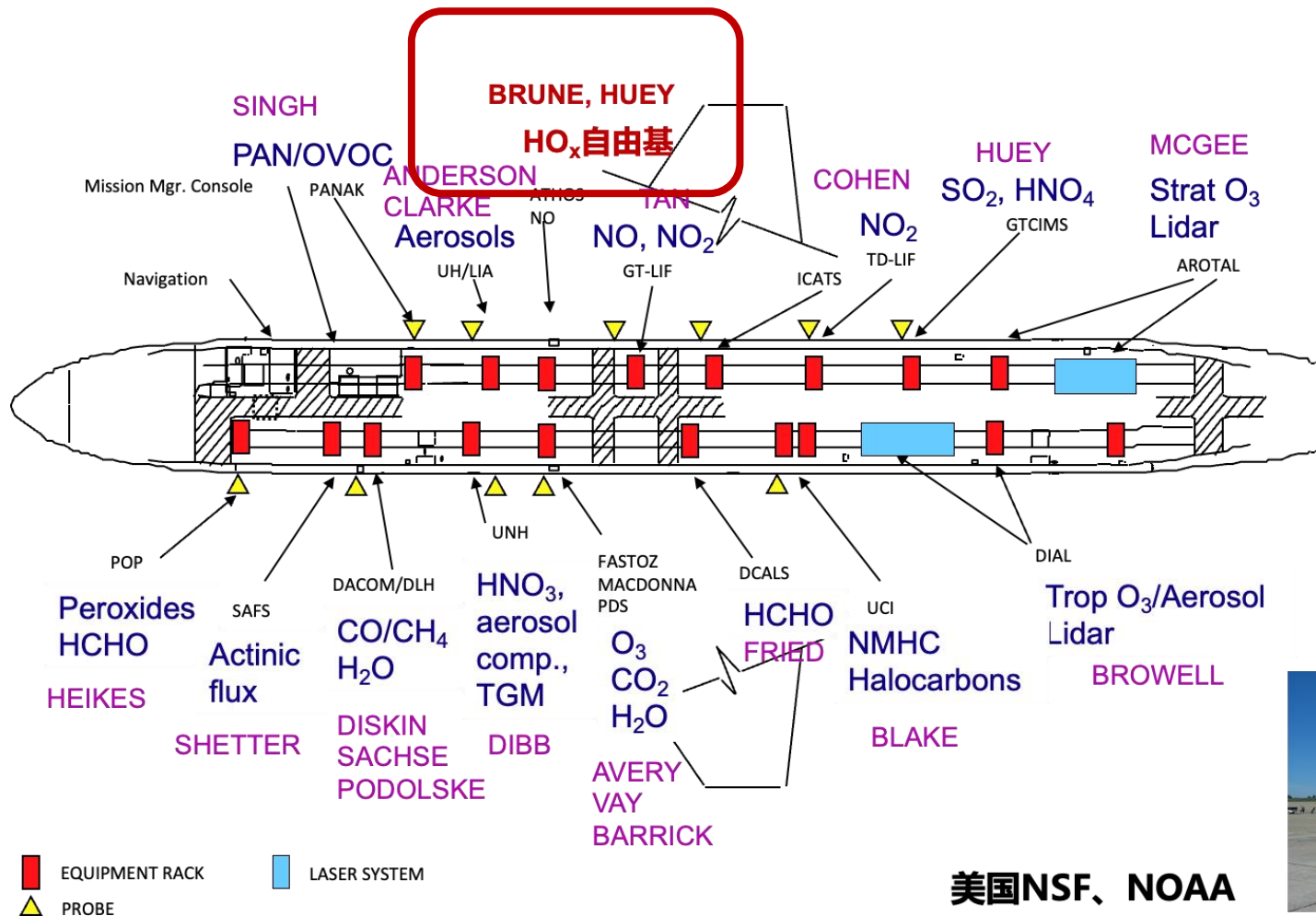
大气自由基研究联盟中长期工作重点

4、推动全球大气自由基观测网建设

Resolution Scale	Metric of interest	Requirement of measurements	Model	Possible improvement
Global	Decadal averaged [OH] for determining CH ₄ lifetime and background O ₃ production	CH ₃ CCl ₃	Earth system model	new tracers (artificially added)
Continental	[OH] variation in the time scale of months	¹⁴ CO	Global model	Interactions between air pollution and climate change
Regional	Regional [OH]	Proxy measurement of regional OH concentration and total reactivity	Regional model	Vertical profile of oxidizing capacity, relation to secondary pollution
Local - Remote	[OH] and total OH reactivity to test against current chemical mechanism	In-situ OH, total and speciated reactivity	Box-model	Atmospheric flagship stations (comprehensive measurements of other oxidants and intermediates species), BVOCs degradation mechanisms, OH parameterization

大气自由基研究联盟中长期工作重点

5、推动基于C919大飞机平台的大气自由基航空测量平台建设



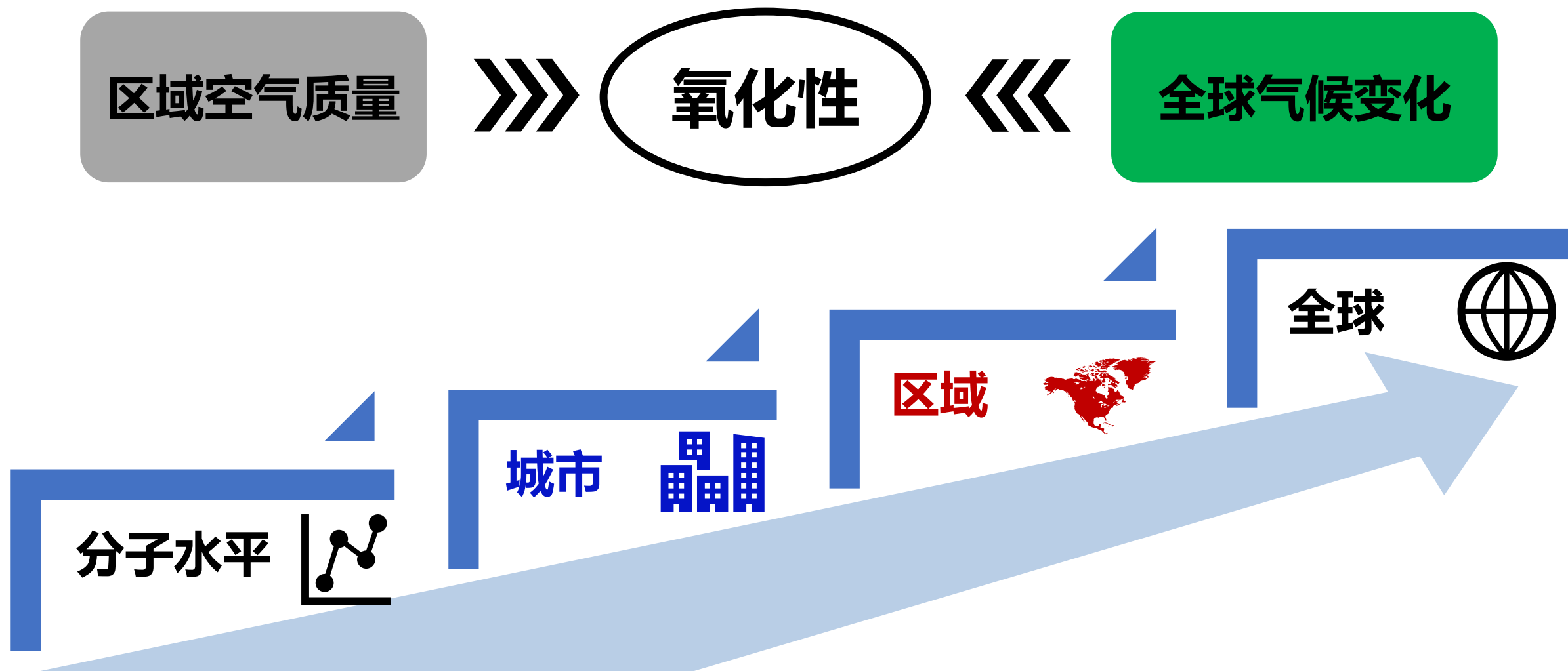
相当于C919



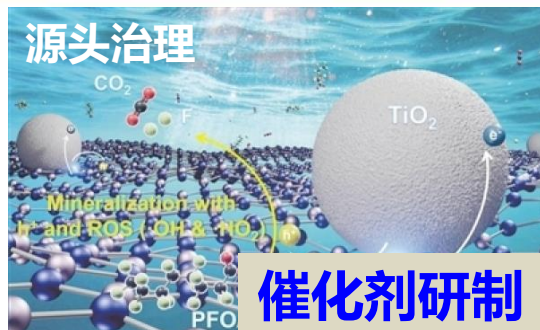
美国NSF、NOAA

提出支撑全球气候变化应对的新理论

构建以**大气自由基复杂体系调控**为科学内涵的**减污降碳协同调控新理论**



十五五研究建议（国家自然科学基金专项项目）



催化剂研制



过程控制



飞机



超级站



科考船

覆盖范围

- 地面观测：各种气候带，昼夜变化和季节变化等
- 边界层：不同高度源排放和化学过程的垂直廓线
- 自由大气：大尺度气象过程与化学的耦合
- 海洋大气：人为活动和海洋大气相互作用机制
- 人居环境：环境自净城市的理论与实践
- 末端控制：高效催化剂开发与工程实践

国产化关键测量技术 (测量和定标)

- OH, HO₂, RO₂, NO₃, Cl: LIF + CIMS
- Reactivity: PL-LIF、CEAS、PTR-MS
- Reactive Nitrogen: CRDs、CEAS、LIF + CIMS
- Reactive Halogen: CIMS、CEAS、DOAS
- Reactive VOCs: CIMS
- 超细颗粒物/分子团簇: HR-ToF-AMS、CIMS

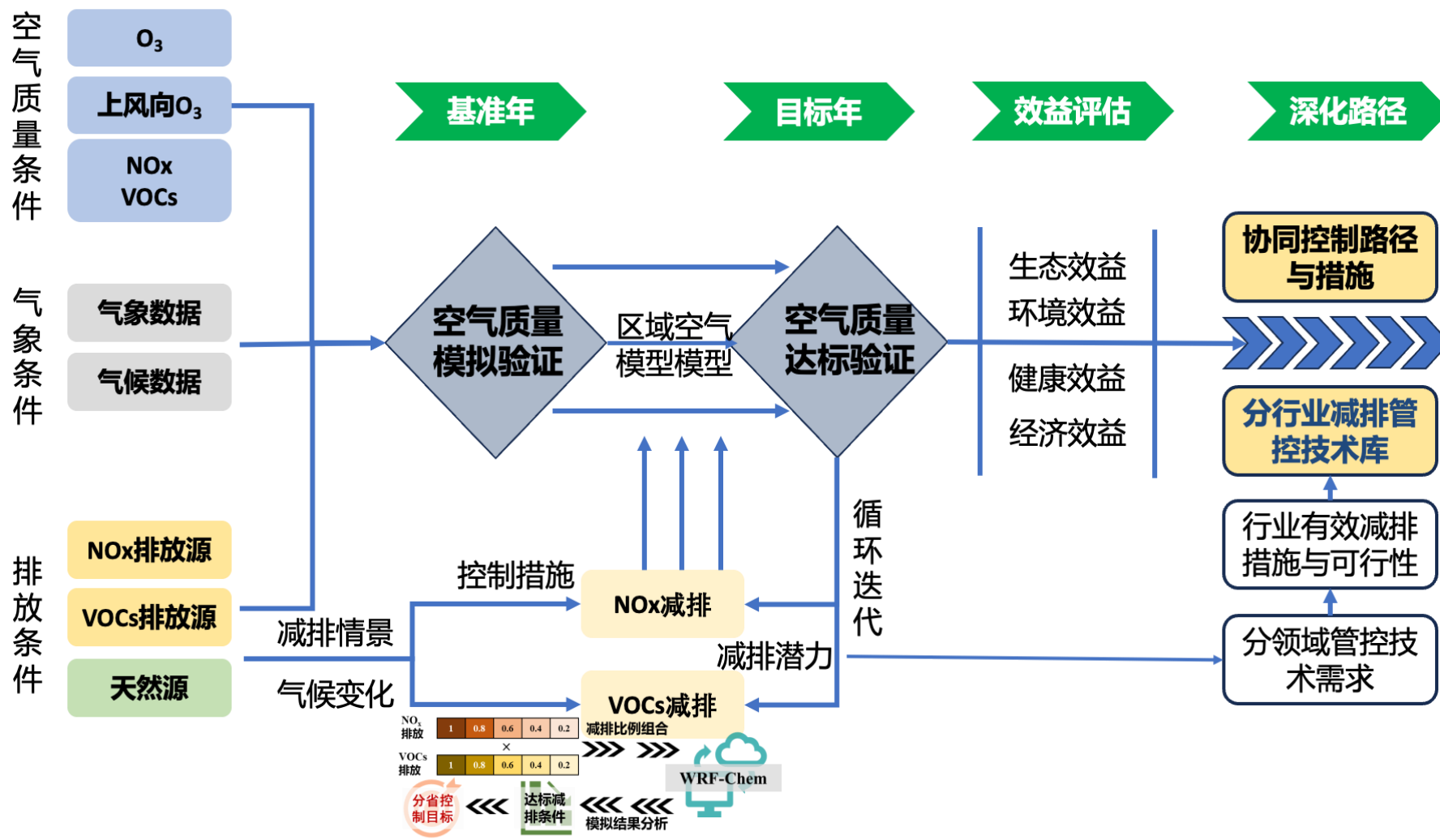
国产催化材料与源头控制

- 工业多污染物全过程排放技术
- 跨介质污染内循环近零排放技术
- 高排放工艺与材料源头替代技术
- 低碳工艺新污染精准控制技术
- 碳中和燃料内燃机近零排放技术
- 农业面源减污降碳绿色防控技术

建议十五五期间建设实现NO_x、VOCs、P(臭氧)和P(自由基)的大科学装置和污染控制的超级示范工程

十五五研究建议（面向美丽中国的减排路径）

- 面向“美丽中国”战略，构建多污染物协同减排情景组合，模拟各情景下目标区域O₃变化趋势，确定2027年、2030年、2035年可实现的空气质量改善目标；并对不同情景的能源、产业结构进行修订以复合碳减排目标。



谢谢大家，请批评指正