

2023 年度“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”推荐书

被推荐人姓名： 柴兆阳 专业技术职务： 高级工程师 专业： 气象学
出生年月： 1989 年 8 月
工作单位： 中国科学院大气物理研究所
电子邮箱： _____ 电话： _____

我郑重推荐 柴兆阳 作为“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”的候选人。

推荐人签名： 曾庆存
推荐人单位公章：



2023 年 12 月 18 日

推荐人姓名： 曾庆存 专业技术职务： 研究员 专业： 大气科学
工作单位： 中国科学院大气物理研究所
电子邮箱： _____ 电话： _____

推荐身份：

- 中国科学院院士 中国工程院院士 国家和部委重点实验室主任
 重点高等院校校长 杰出青年基金获得者 重点科研院所院（所）长
 国家重大科技项目首席科学家 国家高层次人才计划入选者

请简要说明被推荐人的原创性科学或技术成果的内容、重大科学意义、对促进科学技术发展所起的作用及产生的影响（限 2000 字以内，纸面不够可加页），相关证明材料和论文原文请以附件方式提供。

推荐说明

地球系统模式是研究地球各圈层及其相互作用的重要工具，体现了一个国家在地球领域的核心竞争力。“中高层大气模式”涵盖从地表到 500km（临近空间）的全大气范围，也称“全大气模式”，用于开展大气对流层到热层的运动规律及其相互作用的数值模拟研究，在天气气候灾害预防、航空航天、卫星遥感和导航、国防安全等方面都有重要作用，但我国在“中高层大气模式”自主研发上还处于空白，具有潜在的“卡脖子”风险。

柴兆阳博士致力于地球系统模式的研发工作，是我国首个开源地球系统模式——中国科学院地球系统模式（CAS-ESM）研发团队的核心骨干，中高层大气分量模式研发的负责人，“十二五”国家重大科技基础设施“地球系统数值模拟装置”的核心成员。柴兆阳从 2013 年到现在一直围绕自主可控“中高层大气模式”开展相关工作，负责 CAS-ESM“中高层大气环流模式”的自主研发，突破了中高层大气模式动力框架和物理过程中的关键技术，实现了我国自主的中高层大气环流模式（IAP-HAGCM），填补了国内中高层大气模式从无到有的关键技术空白。他的代表性成果包括：（1）突破了中高层大气模式动力框架和物理过程中的关键技术，自主研发了第一代中高层大气环流模式 IAP-HAGCM 1.0，解决了国内中高层大气模式（地表到中层顶）从无到有的关键技术问题；（2）改进模式动力框架和物理过程，解决了模式难以模拟平流层准两年振荡（QBO）的关键难题；（3）采用 IAP-HAGCM 参加了 QBO 国际模式研究计划，独立完成全部模拟试验及数据后处理和提交工作，提高了自主模式的国际影响力。他所研发的 IAP-HAGCM 被“地球系统数值模拟装置”采用，并支持国防领域的业务化应用，其个人作为专职人员支撑“地球系统数值模拟装置”的建设与运行。近年来他的主要工作包括以下三方面：

（1）独立完成 IAP-HAGCM 动力框架的设计和代码编写，填补国内空白。

动力框架是在网格尺度上可以解析的过程的数学物理描述，是大气动力学模型的“骨骼”，它决定了模式的“本”。柴兆阳在大气物理研究所自主对流层大气模式 IAP-AGCM 框架的基础上提出了中高层大气环流模式架构（框架），新增了中高层标准大气廓线（垂直范围覆盖 0-120 km），设计了新的垂直坐标格点，编写代码 61435 行，保证了关键区域的模拟性能（柴兆阳 2020；Chai et al. 2021a），实现了国内中高层大气模式从无到有的突破—IAP-HAGCM 1.0。在此基础上，将 IAP-HAGCM 模式上

界进一步提高到低热层，达到 150 km，包括了完整临近空间（领空范围），进一步改进了标准大气廓线（垂直范围覆盖 0-500 km）和垂直坐标格点，实现了 150 km-中高层大气模式动力框架-IAP-HAGCM 2.0（国内唯一），大幅缩短与国际先进水平的差距，为未来发展国际领先的 0-500km 全大气模式奠定了基础。

(2)配置并改进中高层大气环流模式的物理参数化方案,成功模拟 QBO【独立完成】。

动力框架是模式的“骨骼”，而物理过程参数化方案则是模式的“肌肉”。它是在网格尺度上无法解析的次网格尺度过程的参数化表述，是大气数值模拟不确定性的重要来源。柴兆阳为 IAP-HAGCM 配置了完整的物理过程方案，并针对目前绝大多数模式难以准确模拟平流层纬向风准两年振荡（QBO）开展重点研究。QBO 的形成主要与重力波饱和及其破碎有关，但以往绝大多数低层模式仅仅考虑了地形重力波参数化，柴兆阳则在此基础上进一步同时考虑了由锋生过程和对流过程引起的非地形重力波的影响，改进了重力波参数化方案，更加合理地表述中高层大气的波动强迫特征，使 IAP-HAGCM 很好地模拟出 QBO。他还对 QBO 演化过程的动量收支情况进行了分析，进一步揭示了中小尺度重力波、大尺度波动以及平流等过程的贡献(Chai et al., 2021b)。

准确模拟 QBO 是中高层大气模式发展所面临的巨大挑战，也是衡量中高层大气模式性能的重要指标。为了解决 QBO 数值模拟的关键科学难题，国际知名模式团队在世界气候研究计划（WCRP）框架下发起 QBO 模式研究计划（QBO initiative）。IAP-HAGCM 应邀参加了 QBO initiative，柴兆阳独立完成了计划的全部试验共 378 模式年，后处理并提交数据达 100TB。另外，他还参加了 2023 年在英国举办的 QBO 学术研讨会并展示了 IAP-HAGCM 模拟结果，提高了自主模式的国际影响力。

(3)改进中高层大气环流模式的关键算法,大幅提高计算精度、稳定性和效率【独立完成】。

中高层大气模式与低层模式相比，通常其垂直分辨率更高，垂直分层更多，时间步长更短，因此需要解决中高层大气模式计算效率低和稳定性弱的问题。同时，由于模式采用地形追随坐标，基于气压坐标的差分计算会导致模式在高层计算精度下降，因此需要解决中高层大气模式计算精度差的问题。模式采用标准层结扣除计算气温、地表气压以及位势高度相对“标准大气”的变化，因此需要合理地在线计算预报量的扰动偏差。为此，柴兆阳在三个关键算法上开展了研究：标准层结廓线的离线计算、扰动偏差量的在线计算和湿物理参数化的计算。在标准层结廓线的离线计算方面，针对

标准大气假设，通过 B 三次样条平滑（拟合）和 Akima 三次样条插值，设计了一个新的、拓展性更强的标准层轮廓线及其一、二、三阶导数。在扰动偏差量的在线计算方面，将查表算法从顺序搜索改进为二分搜索，将插值算法从气压插值改进为对数气压插值，极大提高了模式的计算速度和高层大气的计算精度。在湿物理参数化的计算方面，将其限制在平流层以下，避免冗余计算和非物理性求解，极大提高了模式的计算速度和计算稳定性。

此外，还采用了宏定义方式将 IAP-HAGCM 纳入到 CAS-ESM 框架中，实现了在 CAS-ESM 框架中“即插即用”与其他分量模式的耦合。

柴兆阳博士目前在 JAMES、RS、AAS、AOSL 等期刊发表相关论文 11 篇，其中一作/通讯 4 篇，获得计算机软件著作权 4 项。独立完成的“中高层大气环流模式 IAP-HAGCM”被列为“地球系统数值模拟装置”2020 年度建设进展的代表性成果。

柴兆阳博士是 CAS-ESM 研发团队的核心骨干，IAP-HAGCM 是 CAS-ESM 重要组成部分。CAS-ESM 的重大突破在中国科学院“率先行动”第一阶段目标任务总结评估中获得优秀，入选国家十三五科技创新成就奖；以 CAS-ESM 研发团队为主的“大装置”建设团队荣获中国科学院“九章地球模拟科技攻关突击队”称号。此外，“地球系统数值模拟装置”落成启用被《科技日报》评为 2021 年度中国科技的十大突破之一。

（一）代表性论文

1. **Zhaoyang CHAI**, Minghua ZHANG, Qingcun ZENG, et al. A High-top Version of the IAP-AGCM: Preliminary Assessment and Sensitivity, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2021a, 14(2) (CSCD 期刊论文)
2. **Zhaoyang CHAI**, Minghua ZHANG, Qingcun ZENG, et al. Simulation of the QBO in the IAP-AGCM: Analysis of Momentum Budget, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2021b, 14(3) (CSCD 期刊论文)

3. Yufang Tian, **Zhaoyang Chai**, Zipeng Yu, et al. Evaluation of the Horizontal Winds Simulated by IAP-HAGCM through Comparison with Beijing MST Radar Observations, *Remote Sensing*, 2023, 15(14) (SCI 期刊论文)
4. **Zhaoyang Chai**, He Zhang, Mulan Zhang, et al. China's EarthLab—Forefront of Earth System Simulation Research, *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021c, 38(10): 1611-1620 (SCI 期刊论文)
5. He Zhang, Minghua Zhang, Jiangbo Jin,... **Zhaoyang Chai**, et al. Description and Climate Simulation Performance of CAS-ESM Version 2, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2020, 12(12) (SCI 期刊论文)

(二) 软件著作权

1. **柴兆阳**; 张贺; 张明华; 曾庆存; 中高层大气环流模式标准层轮廓线软件, 2022SR0281743, 原始取得, 全部权利, 2022-01-01 (软件著作权)
2. 张贺; **柴兆阳**; 何卷雄; 张明华; 林朝晖; 曾庆存; 大气环流模式 IAP AGCM5 动力框架软件, 2022SR0182144, 原始取得, 全部权利, 2020-05-24 (软件著作权)
3. **柴兆阳**; 张贺; 于子棚; 何卷雄; 张明华; 林朝晖; 曾庆存; 中高层大气模式 IAP-HAGCM 的 QBOi 数值试验后处理软件, 2023SR0471269, 原始取得, 全部权利, 2023-04-13 (软件著作权)
4. **柴兆阳**; 张贺; 张明华; 曾庆存; 靳江波; 谢瑾博; 尤婷; 第一代大气物理研究所中高层大气环流模式 IAP-HAGCM1 软件, 2023SR1468582, 原始取得, 全部权利, 2023-11-20 (软件著作权)

(三) 其他参考文献

1. 柴兆阳 CAS-ESM 中高层大气环流模式的研制与模拟[D]. 中国科学院大气物理研究所, 2020 (博士学位论文)
2. Jinbo Xie, Minghua Zhang, Zhenghui Xie,... **Zhaoyang Chai**, et al. An Orographic-Drag Parametrization Scheme Including Orographic Anisotropy for All Flow Directions, Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2020, 12(3) (SCI 期刊论文)
3. Jinbo Xie, Minghua Zhang, Qingcun Zeng,... **Zhaoyang Chai**, et al. Implementation of an Orographic Drag Scheme Considering Orographic Anisotropy in All Flow Directions in the Earth System Model CAS-ESM 2.0, Journal of Advances in Modeling Earth System, 2021, 13 (SCI 期刊论文)
4. Jiangbo JIN, He ZHANG, Xiao DONG,... **Zhaoyang CHAI**, et al. CAS-ESM2.0 Model Datasets for the CMIP6 Flux-Anomaly-Forced Model Intercomparison Project (FAFMIP), Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(2): 296-306 (SCI 期刊论文)
5. Jiangbo Jin ,Duoying Ji, Xiao Dong, Kece Fei, Run GUO, Juanxiong He, Yi Yu, **Zhaoyang Chai**, He Zhang, Dongling Zhang, Kangjun Chen, Qing-Cun Zeng. 2023: CAS-ESM2.0 dataset for the Carbon Dioxide Removal Model Intercomparison Project (CDRMIP). Advances in Atmospheric Sciences, 2023 (SCI 期刊论文)
6. Ting You, Renguang Wu, Ge Liu, **Zhaoyang Chai**. Contribution of precipitation events with different consecutive days to rainfall change over Asia during ENSO years, Theoretical and Applied Climatology (SCI 期刊论文)
7. Ting You, Renguang Wu, Ge Liu, **Zhaoyang Chai**. Contribution of precipitation events with different consecutive days to summer rainfall change over China, Theoretical and Applied Climatology, 2020, 141: 1493-1510 (SCI 期刊论文)

(四) 附件清单

- a. 荣誉奖励证明材料
- b. 代表性论文全文
- c. 软件著作权证明材料

a. 荣誉奖励证明材料

1. “CAS-ESM 地球系统模式发展与全球气候变化”团队荣誉及个人贡献证明
2. “十二五国家重大科技基础设施——地球系统数值模拟装置”个人贡献证明
3. “九章地球模拟科技攻关突击队”授旗及个人贡献证明

证 明

兹证明中国科学院大气物理研究所柴兆阳为“CAS-ESM 地球系统模式发展与全球气候变化”团队的骨干成员，具体工作中高层大气环流模式的研究与应用。该团队主持的重大突破在中国科学院“率先行动”第一阶段目标任务总结评估中，获得优秀（2020年9月27日）。

证明人

2023年04月14日



荣誉证书

HONORARY CREDENTIAL

“CAS-ESM地球系统模式发展与全球气候变化”团队：
贵团队主持的重大突破在中国科学院“率先行动”
第一阶段目标任务总结评估中，获得优秀。
特发此状，以资鼓励。

中国科学院大气物理研究所

2020年9月27日

证 明

兹证明中国科学院大气物理研究所柴兆阳的研究工作“中高层大气环流模式的研发”被列为“十二五国家重大科技基础设施——地球系统数值模拟装置”2020年度建设进展的代表性成果。具体工作参见《十二五国家重大科技基础设施地球系统数值模拟装置建设进展总结报告（2020年度）》。

证明人：
2023年04月14日

证 明

兹证明中国科学院大气物理研究所柴兆阳为“九章地球模拟科技攻关突击队”的骨干成员，具体工作为：中高层大气环流模式的研发与应用，中科院地球系统模式 CAS-ESM 的发展、数值模拟和分析。大气所九章地球模拟科技攻关突击队是一支诞生于大科学装置建设一线的科技队伍，实现国家重大科技基础设施“地球系统数值模拟装置”提前落成启用，为我国防灾减灾、建设“美丽中国”等提供支撑。2021年7月15日，中国科学院为该突击队授旗。

证明人



2023年04月14日

b. 代表性论文全文

1. **Zhaoyang CHAI**, Minghua ZHANG, Qingcun ZENG, et al. A High-top Version of the IAP-AGCM: Preliminary Assessment and Sensitivity, Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2021a, 14(2) (CSCD 期刊论文)
2. **Zhaoyang CHAI**, Minghua ZHANG, Qingcun ZENG, et al. Simulation of the QBO in the IAP-AGCM: Analysis of Momentum Budget, Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2021b, 14(3) (CSCD 期刊论文)
3. Yufang Tian, **Zhaoyang Chai**, Zipeng Yu, et al. Evaluation of the Horizontal Winds Simulated by IAP-HAGCM through Comparison with Beijing MST Radar Observations, Remote Sensing, 2023, 15(14) (SCI 期刊论文)
4. **Zhaoyang Chai**, He Zhang, Mulan Zhang, et al. China's EarthLab—Forefront of Earth System Simulation Research, Advances in Atmospheric Sciences, 2021c, 38(10): 1611-1620 (SCI 期刊论文)
5. He Zhang, Minghua Zhang, Jiangbo Jin,... **Zhaoyang Chai**, et al. Description and Climate Simulation Performance of CAS-ESM Version 2, Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2020, 12(12) (SCI 期刊论文)

2023 年度“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”推荐书

被推荐人姓名： 华文剑 专业技术职务： 教授 专业： 大气科学

出生年月： 1986 年 2 月

工作单位： 南京信息工程大学 大气科学学院

电子邮箱： 电话：

我郑重推荐 华文剑 作为“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”的候选人。

推荐人签名：
推荐人单位公章：
2023 年 12 月 14 日

推荐人姓名： 陈海山 专业技术职务： 教授 专业： 大气科学

工作单位： 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/大气科学学院

电子邮箱： 电话：

推荐身份：

中国科学院院士 中国工程院院士 国家和部委重点实验室主任

重点高等院校校长 杰出青年基金获得者 重点科研院所院（所）长

国家重大科技项目首席科学家 国家高层次人才计划入选者

请简要说明被推荐人的原创性科学或技术成果的内容、重大科学意义、对促进科学技术发展所起的作用及产生的影响（限 2000 字以内，纸面不够可加页），相关证明材料和论文原文请以附件方式提供。

被推荐人华文剑的主要研究成果

气候变化一直是各国科学家、公众和政策制定者关注的国际热点问题，而人类活动是影响全球和区域气候变化的关键因子。人类活动与气候变化研究需要将大气科学、海洋科学与计算机科学和数值模拟深度融合，被推荐人在上述学科方向潜心耕耘，针对基于多学科交叉的地球系统模拟和机理认识开展了较为系统深入的研究。围绕“人类活动对气候系统的影响”这一关键科学问题，通过应用地球系统模式开展数值模拟，在认识全球气候系统变化中的人类印记、量化人类活动在陆面和海洋不同时间尺度相互作用中的贡献等方面，取得了多项有创新的研究成果，产生了一定的国际影响力。

被推荐人华文剑，现为南京信息工程大学教授、博士生导师。近五年以第一/通讯作者在 Science Advances、GRL、ERL 等发表高水平学术论文 19 篇（其中 SCI 论文 17 篇，包括 GRL 7 篇）。研究成果被 IPCC AR6、Science、Nature 等报告/期刊引用，论文 SCI 总引 983 次（他引 758 次）。先后获江苏省自然科学基金优秀青年基金、江苏省“333 高层次人才培养工程”中青年学术技术带头人、江苏省高等学校科学技术研究成果奖（排名第 1）等学术荣誉，担任 Science 等国际刊物审稿人。

主要研究成果如下：

1. 量化了气候系统内部变率与人为和自然强迫对海温年代际变化的相对贡献，揭示了人类活动对全球洋盆海温年代际变化的影响机理。

1.1. 基于 CMIP5/6、CESM1 和 CanESM2 大样本集合模拟，发现自然和人为气溶胶强迫可以引起同相、多年代际的全球海温变化。在北大西洋，气溶胶通过对太阳辐射的直接和间接作用影响了大西洋海温年代际变化；在热带太平洋，气溶胶强迫会引起海温和海平面气压的纬向变化，有利于引起太平洋海温对气溶胶强迫的响应。

1.2. 通过利用 CMIP6 和 CESM2 集合模拟以及“起搏器”数值试验，揭示了洋盆间相互作用的机理。指出了太平洋和大西洋海温对印度洋海盆模态（IOBM）的影响具有相反的作用；发现了温室气体和气溶胶的年代际变化在 1950 年代后与气候系统内部变率产生的影响存在明显差异，人类活动很大程度上抑制了印度洋海温的年代际变化。

科学影响与评价：相关成果以第一/通讯作者在 Science Advances、GRL、J. Climate 等刊物发表 SCI 论文 7 篇。IPCC AR6 第一工作组报告在第三章和第七章多次引用被推荐人研究成果作为报告的支撑材料。研究工作被英国皇家学会院士、美国科学院院士等在内的科学家正面评价，也被 Science、Nature 等高水平期刊引用和评价（附件 228–256 页）。

2. 结合地球系统模式和观测，定量评估了人类活动对热带雨林和半干旱等陆面热点区域降水变率、欧亚非均匀增暖的影响，揭示了相关的物理机制。

2.1. 基于地球系统模式 CanESM2 和 CMIP5 模式，发现气溶胶会导致萨赫勒与亚马逊降水在年代际尺度上存在显著的“跷跷板型”反相关；指出气溶胶变化会引起热

带大西洋温度的经向梯度加大，导致热带辐合带及与之相联系的雨带向异常偏暖的半球移动，造成亚马逊和萨赫勒的降水出现年代际尺度的反相关关系。

2.2. 基于 **CMIP6 多模式模拟和设计不同气溶胶排放试验**，发现欧洲-西亚和东北亚 56% 以上的陆面增暖是由于人类活动等外强迫所造成，而不是传统观点认为的由气候系统内部变率所主导。同时研究也发现东北亚夏季陆面温度的变化主要来自亚洲外气溶胶的影响，而东亚气溶胶的贡献相对较小。

科学影响与评价：相关成果以第一/通讯作者在 GRL、JGR、Clim. Dyn. 等刊物发表 SCI 论文 5 篇。**IPCC AR6 第一工作组报告在第八章和第十一章中多次正面引用被推荐人成果作为报告的支撑材料。**研究工作被美国科学院院士、AGU/AMS 会士等知名学者正面评价，相关成果也被写入美国 AGU 专著《Geophysical Monograph Series》（附件 257-315 页）。

3. 揭示了土地利用变化的局地和非局地气候效应及模式不确定性问题，定量评估了森林覆盖变化对全球和区域气候的影响。

3.1. 利用 **CMIP6-LUMIP 集成模拟试验**，发现森林砍伐引起的云量变化具有很强的纬向依赖性，热带地区云量减少，温带和北方地区云量增加。通过量化影响云量变化的局部和非局部效应，发现森林砍伐导致热带地区局地云量减少，温带和北方地区局地云量增加。如果不考虑非局部效应，云量变化与森林砍伐之间的关系将被误解。

3.2. 揭示了毁林的生物物理影响并量化了不同生物物理因素（辐射强迫、粗糙度、波文比等）的相对贡献，强调了不同 CMIP6 模式对温度模拟的差异可能主要受非局地大气反馈的调制。其次，基于 **区域气候模式 WRF4.0**，研发了适用于中国区域的**土地覆盖高分辨率产品**，改进了现有模式对城市和湖泊等地表精细化特征的刻画。

科学影响与评价：相关成果以第一/通讯作者在 ERL、JGR、Clim. Dyn. 等刊物发表 SCI 论文 5 篇。关于土地利用变化气候效应的工作被 **2019 年发布的 IPCC《气候变化与土地特别报告》** 引用，被加拿大工程院院士、欧洲科学院院士等知名学者正面评价，荣获《Advances in Climate Change Research》突出贡献论文奖（附件 316-325 页）。

综上所述，被推荐人华文剑通过开展地球系统模式数值模拟，在人类活动与气候系统变化方面做出了突出贡献，取得了丰硕成果，深化了人类活动对全球气候系统影响的认识，具有重要的科学价值和实际应用价值。因此，推荐他作为 2023 年度“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”的候选人。

2023 年度“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”推荐书

被推荐人姓名：___ 王芑 ___ 专业技术职务：___ 副研究员 ___ 专业：___ 大气科学 ___

出生年月：___ 1987 年 3 月 ___

工作单位：___ 复旦大学大气与海洋科学系 ___

电子邮箱：___ 电话：___

我郑重推荐___王芑___作为“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”的候选人。

推荐人签名：___ 张人禾 ___

推荐人单位公章：___ 复旦大学大气与海洋科学系 ___

2023 年 12 月 17 日

推荐人姓名：___ 张人禾 ___ 专业技术职务：___ 特聘教授 ___ 专业：___ 大气科学 ___

工作单位：___ 复旦大学大气与海洋科学系 ___

电子邮箱：___ 电话：___

推荐身份：

中国科学院院士 中国工程院院士 国家和部委重点实验室主任

重点高等院校校长 杰出青年基金获得者 重点科研院所院（所）长

国家重大科技项目首席科学家 国家高层次人才计划入选者

请简要说明被推荐人的原创性科学或技术成果的内容、重大科学意义、对促进科学技术发展所起的作用及产生的影响（限 2000 字以内，纸面不够可加页），相关证明材料和论文原文请以附件方式提供。

细颗粒物 (PM_{2.5}) 和臭氧 (O₃) 协同控制是我国“十四五”规划中大气污染防治的重要目标。挥发性有机物 (VOCs) 是生成O₃和PM_{2.5}中二次有机气溶胶 (SOA) 的重要前体物, 其精准防治是推进PM_{2.5}和O₃协同控制的重要抓手。目前我国人为源VOCs排放的升高已得到逐步控制, 天然源挥发性有机物 (BVOCs) 对大气环境的影响日益突出。被推荐人通过发展和应用数值模式, 围绕“BVOCs与大气环境相互作用”这一关键科学问题, 探究了BVOCs对环境因素的响应机制及其与大气污染和气候变化的相互影响, 为实现污染防治与气候变化减缓和适应双赢目标提供科学支撑。

被推荐人近五年内在 *Environ. Sci. Technol.*、*Geophys. Res. Lett.* 和 *Atmos. Chem. Phys.* 等主流期刊发表论文50篇, ESI高被引论文2篇, 其中以第一或通讯作者发表27篇, 论文总被引超2700次。被推荐人担任世界气候研究计划 (WCRP) 支持的旗舰计划城市环境与区域气候变化 (URB-RCC) 工作组的主要成员、第三届环境科学与工程前沿 (FESE) 青年论坛组委会委员及FESE期刊客座编辑等。多次在大洋洲地球科学学会 (AOGS) 和美国地球物理学会 (AGU) 等国际会议组织了天然源排放研究的分会场。并作为邀请报告在26届中国大气年会和第十届VOCs污染防治专委会汇报了相关模式开发的工作。主要学术成果包括:

(1) 耦合主流BVOCs排放模式, 改进了BVOCs排放因子以提升准确性, 完善了干旱-BVOCs的响应模块, 并阐明我国干旱事件对BVOCs排放的影响: 当前用于估算BVOCs排放的两种主流模式分别是MEGAN和BEIS, 均对BVOCs的估算存在不确定性。以往研究表明, BEIS模式低估了10~50%的BVOCs排放而MEGAN模式则存在显著高估的问题 (15~200%), 为准确评估BVOCs对大气环境的影响带来挑战。针对上述问题, 被推荐人研发了“MEGAN-BEIS”排放模式, 有效解决了MEGAN模式对BVOCs排放的高估问题, 使模式中异戊二烯这种主要BVOCs的平均分数偏差从0.98下降到了0.11。此外, 被推荐人还率先研究了以干旱为代表的极端天气事件对BVOCs排放及空气质量的影响, 完善了模式中干旱-BVOCs的响应机制, 为未来极端事件频发情景下大气污染控制路径的完善提供工作基础。国际著名大气化学模式权威学者GEOS-Chem模式创始人Daniel Jacob教授团队的论文, 称改进后的MEGAN-BEIS模式与卫星遥感数据更符合, 有力提升了模式的模拟。MEGAN模式的创始人Alex Guenther教授还将被推荐人的干旱响应参数

化方案，作为在地球系统模型中表征干旱-热胁迫对异戊二烯排放影响算法的代表。

(2) 开发了基于前体物示踪的SOA和O₃源解析模块，将混合控制区生成的O₃首次加入大气化学传输模式，改进了传统O₃源解析方法，从而明确了BVOCs对我国二次污染物的贡献：现有大气化学传输模式中缺少对SOA的源解析模块，对O₃的源解析也仅考虑了传统的二分法，难以准确定量BVOCs对空气质量的影响。被推荐人开发了基于前体物示踪的SOA和O₃源解析模块，使大气化学传输模式具备了同时对这两种二次污染物进行溯源分析的能力，并创新性的将混合控制区生成的O₃添加到模式中，率先定量分析了混合区对O₃生成的贡献。研究明确了我国二次污染物的主要来源和成因，定量分析了二次污染物浓度与大气氧化性的响应关系，为大气污染协同防控提供科学支撑。美国艺术与科学院院士、地球物理协会会员Michael McElroy教授团队在其发表文章中引用本研究成果，作为定量分析BVOCs对夏季O₃贡献的重要参考。该模式也被国内众多研究单位所应用，作为研究大气二次污染来源成因的主要工具，包括：清华大学、上海交通大学和四川大学等。

(3) 利用所开发的模式，对人为源排放展开深入探讨，明确了人为排放变化和气象条件对大气污染的影响，为研究BVOCs和人为源的相互作用提供了坚实的基础：明确复合大气条件下BVOCs与人为源污染物的相互作用机制，是当前大气污染管控的重要课题，并高度依赖于对人为源排放的认知。被推荐人利用所开发的模式，厘清了不同人为源排放的贡献。此外，被推荐人进一步对交通源这一主要人为源排放进行了探究，通过改进现有指南中速度修正因子的计算方法，为模式提供了高精度（0.1度）清单。西班牙环境与水资源研究院Damià Barceló教授在其主编的Nature-Based Solutions Impact on Urban Environment Chemistry一书中引用了本研究成果，用于阐述机动车排放源对城市污染的影响。发展的清单构建方法也作为重要技术指导，被包括中科院大气物理研究所、地理科学与资源研究所和浙江大学等多家科研机构使用。

综上，被推荐人在针对天然源对大气化学模式的开发、应用方面取得了突出成绩，揭示了天然源-大气环境相互作用新的重要科学认知。因此，我推荐她参评2023年“清华大学-浪潮集团计算地球科学青年人才奖”。

2023 年度“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”推荐书

被推荐人姓名： 张旭 专业技术职务： 研究员 专业： 数值预报

出生年月： 1983 年 3 月 18 日

工作单位： 中国气象局上海台风研究所

电子邮箱： _____ 电话： _____

我郑重推荐 张旭 作为“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”的候选人。

推荐人签名： 沈学顺
推荐人单位公章：
2023 年 12 月 5 日

推荐人姓名： 沈学顺 专业技术职务： 院士、研究员 专业： 数值预报

工作单位： 中国气象局地球系统数值预报中心

电子邮箱： _____ 电话： _____

推荐身份：

- | | | |
|---|--|---------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 中国科学院院士 | <input checked="" type="checkbox"/> 中国工程院院士 | <input type="checkbox"/> 国家和部委重点实验室主任 |
| <input type="checkbox"/> 重点高等院校校长 | <input type="checkbox"/> 杰出青年基金获得者 | <input type="checkbox"/> 重点科研院所院（所）长 |
| <input checked="" type="checkbox"/> 国家重大科技项目首席科学家 | <input checked="" type="checkbox"/> 国家高层次人才计划入选者 | |

请简要说明被推荐人的原创性科学或技术成果的内容、重大科学意义、对促进科学技术发展所起的作用及产生的影响（限 2000 字以内，纸面不够可加页），相关证明材料和论文原文请以附件方式提供。

大气数值模式中湍流、对流等次网格物理过程的参数化对于模式分辨率具有高度的依赖性。随着模式分辨率逐渐提高至公里级甚至百米级，原有在粗网格下（如百公里分辨率的气候模式）发展的物理过程参数化的物理假定不再成立，直接提高分辨率会导致“灰色区域”等问题，严重影响模式预报效果。因此，发展尺度自适应的物理过程参数化是当前数值预报发展面临的重大挑战之一，是国际前沿课题。

张旭博士长期从事数值预报模式尺度自适应的湍流和对流参数化研究，在**尺度自适应的三维湍流参数化方案研发、与湿对流过程相关的湍流闭合方法发展以及尺度自适应对流参数化的分析与应用**方面取得了创新成果，具体如下：

1. 建立了尺度自适应的三维湍流参数化方案（SMS-3DTKE），解决大气边界层参数化的“灰色区域”问题

当模式网格距与含能湍流尺度相当时，传统边界层参数化面临“灰色区域”问题：第一，网格内的湍流统计样本减少，造成传统边界层方案的集合平均假定失效；第二，湍流水平输送变得越来越重要，只考虑垂直混合的边界层方案不再适用。张旭博士针对上述问题，发展了一种不同于传统一维大气边界层方案的、具有尺度自适应功能的三维湍流参数化方案。该方案通过构建依赖于湍流动能的水平扩散方案和求解完整的湍流动能预报方程，实现了垂直和水平方向次网格混合在物理和数学上的一致性，突破了传统大气边界层方案只有垂直一维方向的局限性；通过考虑非局地通量的尺度依赖性，实现了次网格湍流参数化方案从大涡尺度到中尺度的尺度自适应。该方案改善了模式在“灰色区域”分辨率时对大气边界层湍流的模拟，并在主流期刊发表文章（Zhang et al. 2018, *Mon. Wea. Rev.*; Zhang 2021）。

新方案可取代传统的大气边界层方案，具有良好的应用前景。方案受到了国内外模式发展专家的关注，作为独具特色的物理参数化方案被美国大气科学研究中心

（NCAR）中小尺度气象实验室（MMM）新一代中尺度模式 WRF 所采用，于 2020 年 4 月在 WRF4.2 版本中正式公开发布（附件 1）。同时，新方案也影响了美国业务

模式 FV3 的物理过程更新计划，并在美国飓风预报系统模式（FV-based Hurricane Forecast System, HAFS）中实施应用（附件 2）。此外，方案被数值预报领域专家的工作多次使用或引用，例如，德国霍恩海姆大学 Hans-Stefan Bauer 教授在其文章中用一整段落论述了该方案的物理先进性，认为该方案代表了未来湍流参数化的发展方向（附件 3）。

2. 发展了与湿对流过程相关的湍流参数化闭合方法，扩展了三维湍流参数化方案的应用范围

湍流不只存在于大气边界层中，也普遍存在于湿对流系统内，而前人湍流参数化的研究主要集中于边界层内。目前公里尺度数值天气预报模式中使用的湍流参数化方案无法合理表征对流云内的湍流输送过程。张旭博士构建了百米级的台风大涡模拟基准数据集，并利用该数据集发展了基于网格尺度量水平梯度的、尺度相似性湍流通量闭合方法。与传统的涡动扩散闭合方法相比，新闭合方法可合理表征对流云内的湍流输送，对对流强度、结构的模拟均有明显改善。将该闭合方法整合进三维湍流混合参数化方案(SMS-3DTKE)中，使得该方案不仅能表征边界层内的湍流，而且能够表征整个大气的三维湍流运动，极大地扩展了方案的应用范围。

相关成果在地学模拟主流期刊发表（Ye, Zhang et al. 2023, *J. Adv. Model. Earth Syst.*）。凭此成果，张旭博士获得了出版社 Wiley 集团的“威立中国开放科学高贡献作者奖”（附件 4）。

3. 系统研究了尺度自适应对流参数化方案的物理假定，研究成果应用于业务预报系统，并改进了预报效果

传统对流参数化的物理假定在高分辨率下失效，亟待对失效的物理假定进行研究以便做一般性的扩展。张旭博士利用建立的对流超级单体和实际台风个例的大涡模拟基准数据（Liu, Zhang et al. 2023, *Atmos. Research*），对尺度自适应的对流参数化方案三个主要组成部分（触发函数、积云模型、闭合条件）在“灰色区域”尺度下的有效性进行了系统性分析评估，揭示了目前对流参数化方案中不依赖于瞬时动力强迫的触发函数和诊断云模型等在公里尺度分辨率下的不适用性，并对触发函数进行改进，使之更强的依赖于网格尺度动力强迫（Zhang et al. 2021, *Mon. Wea. Rev.*）。同时揭示出公

里尺度次网格云呈现的与传统参数化截然不同的垂直廓线特征 (Zhang et al. 2023, *J. Adv. Model. Earth Syst.*)。将改进的尺度自适应对流参数化方案应用于华东区域中尺度数值预报业务系统 (CMA-SH9)，明显改善了 CMA-SH9 降水预报过强、过大，空报率过高，雨带呈现分散、无组织的形态等问题，显著提高了降水预报能力 (Zhang et al. 2021, *Wea. Forecasting*)。

以上工作阐明了尺度自适应对流参数化的物理基础，在主流期刊发表系列文章 (Zhang et al. 2021, *Mon. Wea. Rev.*; Zhang et al. 2021, *Wea. Forecasting*; Zhang et al. 2023, *J. Adv. Model. Earth Syst.*; Liu, Zhang et al. 2023, *Atmos. Research*)。相关研究受到审稿人的高度评价，如“.....the science is at the forefront of the discipline.”，“.....the paper is a significant contribution.....”等 (附件 5)。

综上所述，张旭博士围绕尺度自适应的湍流和对流参数化问题开展了系列研究，取得了丰硕成果，近五年以第一/通讯作者在《*J. Adv. Model. Earth Syst.*》、《*Mon. Wea. Rev.*》、《*Wea. Forecasting*》等国际主流期刊上发表论文 8 篇。研发的新方案作为独具特色的物理参数化方案被美国大气科学研究中心 (NCAR) 新一代中尺度模式 WRF 所采用。新方案也影响了美国业务模式 FV3 的物理过程更新计划，并已经在美国飓风预报系统模式 (HAFS) 中实施应用。成果获“Wiley 中国开放科学高贡献作者奖”及“上海市气象局气象科技成果奖一等奖” (附件 6)。同时，张旭博士于 2018 年入选中国气象学会“第九届全国优秀青年气象科技工作者” (附件 7)，2021 年入选中国气象局“气象高层次科技创新人才青年气象英才计划” (附件 8)。张旭博士在此方向的工作，既有理论先进性，也有实际应用价值，为发展自主创新、居于世界前列的中国数值预报系统做出了重要贡献。鉴于此，我郑重推荐张旭博士作为“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”的候选人。

推荐人：沈学顺

2023 年 12 月 5 日

近五年代表性论文列表：

Zhang, X., Bao, J., Chen, B., and Grell, E., **2018**: A Three-Dimensional Scale-Adaptive Turbulent Kinetic Energy Scheme in the WRF-ARW Model. *Mon. Wea. Rev.*, 146(7), 2023-2045.

Ye, G. J., **Zhang, X.***, and Yu, H. **2023**. Modifications to three-dimensional turbulence parameterization for tropical cyclone simulation at convection-permitting resolution. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 15, e2022MS003530. <https://doi.org/10.1029/2022MS003530> (通讯作者)

Zhang, X., Bao, J.-W., Huang, W., and Yu, H. **2023**. Statistics of the subgrid cloud of an idealized tropical cyclone at convection-permitting resolution. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 15, e2022MS003534. <https://doi.org/10.1029/2022MS003534>

Zhang, X., Bao, J., Chen, B., and Huang, W., **2021**: Evaluation and Comparison of Two Deep Convection Parameterization Schemes at Convection-Permitting Resolution. *Mon. Wea. Rev.*, DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR-D-21-0016.1>

Zhang, X., Yang, Y., Chen, B., and Huang, W., **2021**: Operational Precipitation Forecast over China Using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model at a Gray-Zone Resolution: Impact of Convection Parameterization, *Weather and Forecasting*, 36(3), 915-928.

Liu, M. J., **Zhang, X.***, Zhu, X. S., and Yu, H. **2023**. Large-eddy simulation of the rapidly intensifying tropical cyclone Soudelor (2015). *Atmospheric Research*, 294, 106976. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106976> (通讯作者)

Xu Zhang, Chapter 7 - Subgrid turbulence mixing, Editor(s): Haraldur Ólafsson, Jian-Wen Bao, *Uncertainties in Numerical Weather Prediction*, **2021**, Elsevier, Pages 205-227.

2023 年度“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”推荐书

被推荐人姓名：__郑博__ 专业技术职务：__助理教授__ 专业：__环境科学与工程__

出生年月：__1988 年 12 月__

工作单位：__清华大学深圳国际研究生院__

电子邮箱：__ 电话：__

我郑重推荐_郑博_作为“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”的候选人。

推荐人签名：

推荐人单位公章：

2023 年 10 月 20 日

推荐人姓名：__贺克斌__ 专业技术职务：__教授__ 专业：__环境科学与工程__

工作单位：__清华大学环境学院__

电子邮箱：__ 电话：__

推荐身份：

- 中国科学院院士 中国工程院院士 国家和部委重点实验室主任
重点高等院校校长 杰出青年基金获得者 重点科研院所院（所）长
国家重大科技项目首席科学家 国家高层次人才计划入选者

请简要说明被推荐人的原创性科学或技术成果的内容、重大科学意义、对促进科学技术发展所起的作用及产生的影响（限 2000 字以内，纸面不够可加页），相关证明材料和论文原文请以附件方式提供。

申请人聚焦碳污协同感知这一基础科学问题（图 1），立足于学科交叉和系统科学的方法，发展高分辨排放清单和基于卫星遥感的多组分排放感知技术，改进大气痕量气体关键源汇过程的模拟和反馈机制，开发了基于变分同化的源汇一体化大气反演系统，开展了碳污融合源汇收支定量、时空演变重构及驱动因素研究。在这一方向，近三年以第一/通讯作者发表 Science 正刊论文 1 篇、Science Advances 论文 3 篇、Nature Communications 论文 1 篇、Science Bulletin 论文 1 篇。有关野火碳排放的 Science 论文入选杂志亮点研究，并由 Science 杂志社在 2023 年美国科学促进会年会举办专题新闻发布会，被新华网、光明日报、中国科学报、美联社、法新社等全球百余家新闻媒体报道。在 2023 年 9 月由美国国家科学院、工程院、医学院联合主办的野火碳排放国际学术会议上，申请人是唯一来自中国学术机构受邀参会并做专题报告的专家。Science Advances 论文系列成果被国际大科学计划“全球碳计划”采纳，是有关领域被采纳和引用的唯一成果。Nature Communications 研究成果被光明日报正面报道。Science Bulletin 论文入选第七届中国科协优秀科技论文，是当年大气科学领域唯一一篇获奖论文。

申请人 2020–2023 年连续四年入选科睿唯安全球高被引科学家，2021 年入选首批国家自然科学基金优秀青年科学基金项目（海外），2021 年由中国环境科学学会推荐入选第六届中国科协青年人才托举工程，2023 年获教育部自然科学一等奖。

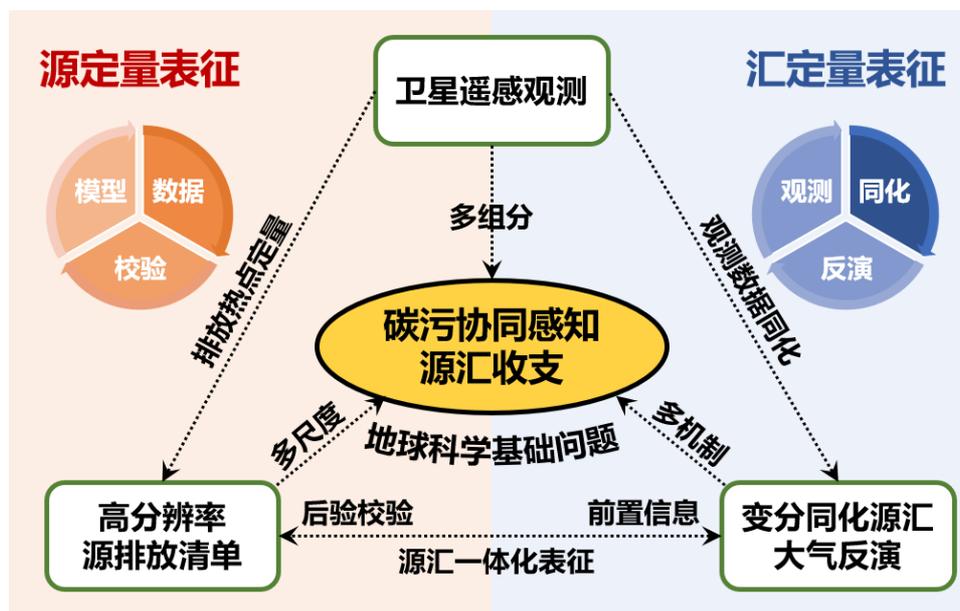


图 1 申请人学术研究工作的主要框架

申请人的学术成绩包括以下三个方面：

1. 揭示了排放清单网格空间分辨率与排放数据不确定性的非线性关系，指出当前区域排放清单通过空间降尺度方法生成的高分辨率排放网格数据的精度局限，进一步建立了自底向上、集成海量大点源数据、高分辨率机动车网格的高分辨率排放动态表征模型及精细排放网格数据集，被国内外同行广泛采用。

申请人系统评估了排放数据精度随网格分辨率提高而下降的非线性响应机制；基于我国排放源组成开发了兼顾排放网格空间分辨率与数据精度的多尺度排放源模型；建立了涵盖多种大气成分的高分辨率排放清单数据集。首次构建了我国 1 公里分辨率全国人为源排放网格（图 2），系统改进了大气化学模式模拟效果。重构了 2010 年以来我国人为源排放变化，首次量化解析了以大气污染防治行动计划为核心的大气污染防治进程对我国大气成分排放变化的影响。针对排放数据更新滞后的问题，申请人建立了基于时空多源大数据融合的近实时排放清单建立方法，突破了现有清单的时滞性。

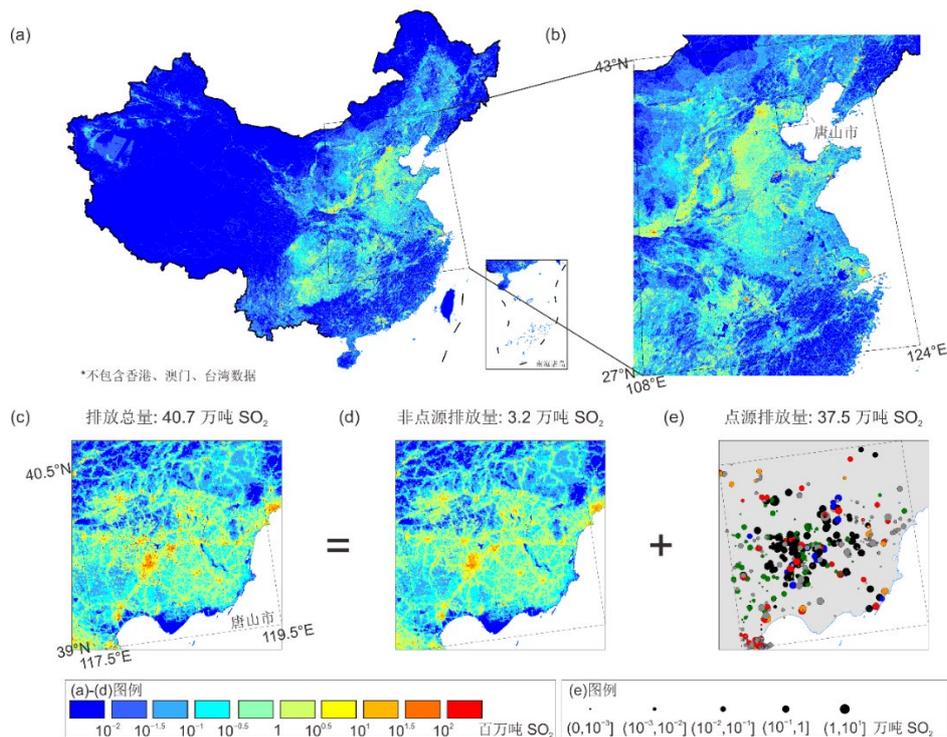


图 2 申请人建立的我国 1 公里分辨率 SO₂ 排放网格

2. 突破了基于多源卫星遥感的碳污融合感知原理，建立了碳污排放动态变化的协同反演方法，研发了我国高污染背景下区域与城市人为源碳污融合排放动态反演算法，并率先实现了全球野火碳污排放的协同动态溯源与反演定量。

申请人基于碳污同源性原理，突破了耦合近实时多源卫星遥感观测、大气化学传输模型、前置排放源信息、多组分排放清单网格的碳污耦合协同反演原理和方法，实现了人为源 CO₂ 与 NO_x 排放、天然源野火 CO₂ 与 CO 排放协同动态反演，为建立面向碳污融合多组分源表征的高分辨率近实时反演探索了可行方向。申请人首次基于卫星遥感准确定量了 2020 年新冠疫情防控期间我国人为源 NO_x 和 CO₂ 分部门排放在天尺度的动态变化(图 3)，进一步成功实现了 2020-2022 多年排放变化的连续动态反演。针对天然源野火排放，申请人创新性基于 CO 排放反演数据重构野火燃烧效率的时空动态变化（图 4），实现了野火 CO₂ 排放的动态监测，反演量化了 2000 至 2021 年全球野火 CO₂ 排放的时空格局，系统解析了北半球中高纬地区 2021 年极端野火排放的驱

动因素，揭示了气候变暖-野火排放正反馈机制的气候风险。相关研究成果以第一作者先后发表于 Science Advances 和 Science 正刊，Science 论文入选杂志亮点研究。

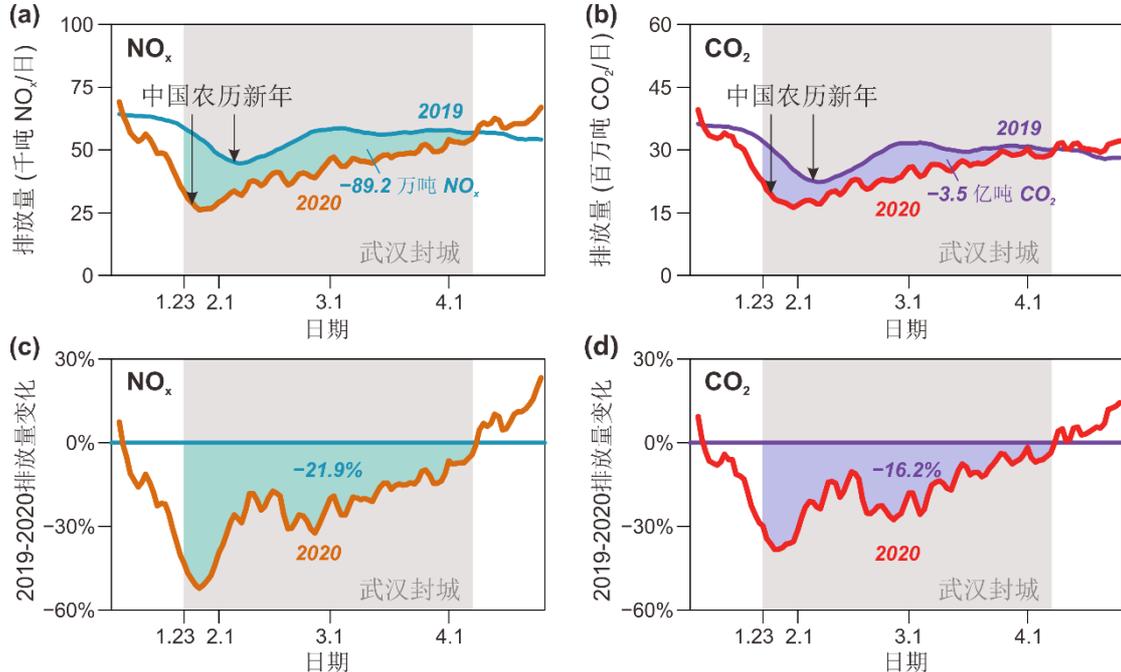


图3 申请人基于卫星遥感反演我国人为源 NO_x 和 CO₂ 天排放

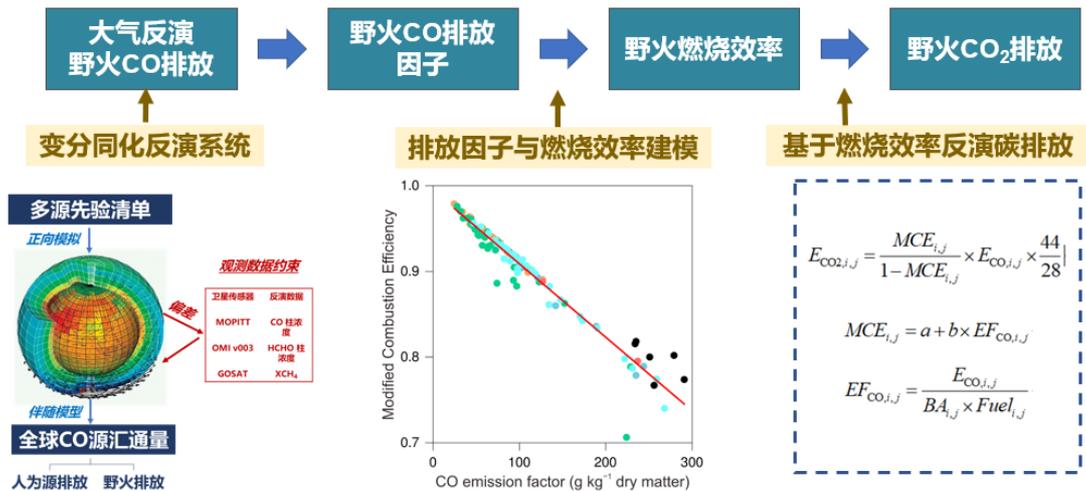


图4 申请人基于卫星遥感反演全球野火 CO 与 CO₂ 排放协同动态变化的原理

3. 基于大气碳循环框架构建了涵盖 CO₂、CH₄、CO 三种含碳痕量气体的源汇一体化大气反演算法，基于多源卫星遥感重构了各自源汇收支的时空动态变化，厘清了大气中 CO 与 CH₄ 竞争 OH 自由基对各自源汇平衡机制的反馈作用。

申请人从多种含碳痕量气体源汇一体化出发建立多组分大气反演系统，首次构建了基于实际碳卫星观测约束并耦合四维扩展局地集合转换卡尔曼滤波的全球碳同化反演算法，基于 CO、CH₄ 与 OH 的竞争反应机制和贝叶斯原理变分同化算法实现对 CO 和 CH₄ 的源汇一体化反演，定量解析了 CO 与 CH₄ 竞争 OH 自由基对各自源汇平衡的反馈，重构了 2000 年以来全球和区域 CO₂、CO 和 CH₄ 源汇收支数据集。

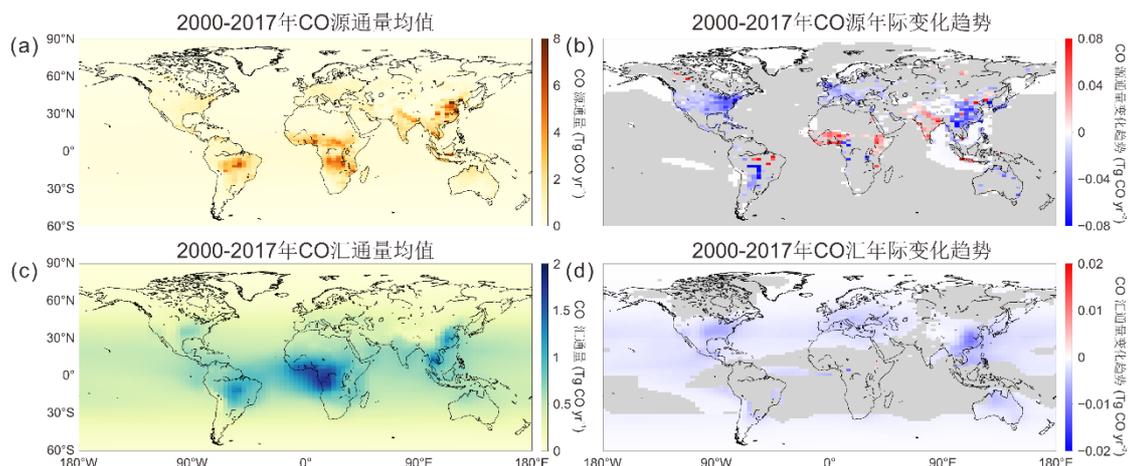


图 5 申请人基于多颗卫星遥感观测反演的全球 CO 源汇收支数据集

申请人研发的全球碳同化反演系统，准确评估了全球和区域 CO₂ 源汇收支，是首批获得全球碳计划认证、中国自主知识产权的碳反演系统（全国共两个）。在全球碳计划 GCP 发布的全球碳收支最新研究论文 *Global Carbon Budget 2022* 中，明确指出：“CO 的排放和汇单独分析并发布在全球 CO 源汇分析文章中……Zheng et al., 2019”，这里唯一引用的即是申请人 CO 源汇收支工作。在 GCP 发布的全球甲烷收支最新研究成果中，申请人建立的全球 CH₄ 源汇数据集是被采纳的全球 15 组 CH₄ 反演结果之一。