

2021 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：___高蒙___ 专业技术职务：___副研究员___ 专业：___大气科学___
出生年月：___1991 年 9 月___
工作单位：___香港浸会大学深圳研究院___
电子邮箱：___ 电话：___

我郑重推荐___高蒙___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：_____



推荐人姓名：___刘文清___ 专业技术职务：___教授___ 专业：___大气环境科学___
工作单位：___中国科学院合肥物质科学研究院___
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 重点科研院所院（所）长
杰出青年基金获得者或与之相当的人才计划学者 国家重大科技项目首席科学家

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。

气溶胶污染影响大气能见度、危害人体健康，是影响地球能量收支的重要因素，对云、降水、气候变化等也起重要作用。被推荐人围绕“气溶胶污染的形成机理、长期趋势及其与天气、气候的相互作用过程”这一关键科学问题，通过发展和应用数值模式，深化了对于亚洲重污染区域气溶胶污染的发生，及其与气象、气候过程在不同尺度上相互作用机理的认识。

被推荐人在重要国际期刊以第一/通讯作者发表论文 20 余篇，其中 Science Advances 2 篇，美国气象学会旗舰期刊 BAMS 1 篇，ESI 高被引论文 2 篇。论文总引用近 2700 次；部分研究成果被 Nature India、Science Daily 等媒体作为科学亮点报道；应世界气候研究计划(WCRP)联合科学委员会主席 Guy Brasseur 邀稿发表 Springer 著作章节 1 篇；应 Elsevier 编辑部邀请编辑著作一本；两次受印度阅读量前三的英文报纸 The Hindu 邀请专访讨论研究成果。部分研究成果对我国及亚洲其他国家（印度、韩国等）大气污染防治和相关科学研究实验的开展起了一定的支撑作用。被推荐人现任世界气象组织全球空气质量预测与信息系统（WMO GAFIS）科学指导委员会委员，是该委员会中唯一的青年科学家；曾应邀在美国哈佛大学、美国耶鲁大学、德国马普化学所、韩国延世大学等国际著名研究机构作邀请报告。2017 年，应美国能源部布鲁克黑文国家实验室邀请参加大气化学新兴高级科学家研讨会（ACCESS XIV，每两年邀请全球 25 人参加）；2020 年，欧洲地球科学联合会（EGU）授予被推荐人大气科学学部杰出青年科学家奖，成为该年度所有学部获奖人中唯一的中国人。EGU 官网对其学术成果总结性评价为“Gao 在重污染地区霾污染与气候相互作用方面做出了原创性贡献”。

主要学术成果包括：

（1）发展气溶胶污染季节性预测模型：气溶胶污染的长期变化趋势除了受到人为源排放强度影响外，也受到气象条件和大尺度环流特征的影响。了解气候特征对气溶胶污染的影响，可以帮助预测污染发生的严重程度并更好地规划污染控制措施。被推荐人通过分析印度地区观测和再分析资料中的近地表风速数据发现风速在过去 40 年中在显著减弱；通过数值模拟实验，申请人揭示印度洋的持续增温是主因，且这样的减弱会加剧气溶胶污染并对通过发展风能缓解污染/气候变化的策略造成挑战。此外，被推荐人通过统计分析气溶胶卫星观测数据进一步发现印度冬季气溶胶污染的年际波动主要受到厄尔尼诺和南极涛动所引起的海温异常影响。由于海水大比热容的特性，厄尔尼诺和南极涛动的所引起的海温异常可以跨季节维持。被推荐人利用此特性构建了冬季气溶胶污染的季节性预测模型，并进一步利用地球系统模式 CESM 数值模拟实验阐明了预测模型的物理意义。这些结果增强了对雾霾发生的气候变化背景的认识，而霾的季节性预测也可以为污染控制提供先前信息。

被推荐人在此方向上于 Science Advances 发表两篇一作论文。印度科学院科学家

T. V. Ramachandra 教授点评“Gao 提出的在风速受气候变化影响较小的地区投资风资源是一个非常好的想法”。利用海洋记忆性预测气溶胶污染的研究发表后，印度最老、发行量最大的印度时报集团在《经济时报》撰文报道“Gao 等新的研究可以提前几个月预测气溶胶污染情况，让政府有足够时间改进污染控制措施”。

(2) 开发新方法约束气溶胶辐射反馈作用估计不确定性：气溶胶通过对辐射的吸收和散射作用影响大气边界层的发展和大气环流，进而改变气溶胶的扩散条件和化学生成过程。在欧美发达国家，由于气溶胶浓度较低，这样的辐射反馈作用并不突出，而在我国高气溶胶浓度情形下却有可能发挥重要作用。被推荐人针对这样的科学问题，量化气溶胶-辐射-边界层-天气反馈过程对于 $PM_{2.5}$ 浓度增长的定量贡献，并揭示了气溶胶辐射反馈与排放变化的协同作用。作为亚洲模式比较计划三期 (MICS-Asia III) 空气质量与气候变化课题的负责人之一，被推荐人使用七种气象-化学耦合模型集合去降低气溶胶反馈作用估计的不确定性，并通过敏感性分析量化气溶胶辐射强迫的来源，为控制方案的制定提供科学依据支撑。此外，被推荐人还通过发展耦合模型同化地表 $PM_{2.5}$ 观测的方法进一步约束气溶胶反馈评估的不确定度。

(3) 揭示当前主流模式模拟我国特殊环境下无机盐和气溶胶酸度存在的问题并优化改善：当前国际主流的空气质量模式是基于国外观测的污染特征所建立的，被推荐人在应用到中国重霾过程的模拟时发现了不适用的情况。被推荐人从硫酸盐的生成机制，气溶胶酸度的模型估算，气溶胶资料同化等角度，改善了空气质量模型大大低估华北重霾时硫酸盐浓度及高估硝酸盐浓度的问题，发展了耦合模型同化地表 $PM_{2.5}$ 观测的方法，改进了主流热力学模型估算我国气溶胶酸度差异大等问题。J. Seinfeld 院士发表在 Nature Geo. 上的文章指出“Gao 等模型研究和氧 17 同位素研究都证实了 NO_2 对于硫酸盐生成的重要性”。改进的同化方案被 NASA 开展的飞机航测实验 KORUS-AQ 的实时空气质量预测系统所使用。

综上所述，被推荐人在气象-化学耦合模式的发展、应用方面取得了较为突出的成绩，提升了多时间尺度气溶胶污染预测的准确度，并深化了对气溶胶-气候相互作用的科学认知。因此，我推荐他参评 2021 年“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”。

2021 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：___王勇___ 专业技术职务：___副教授___ 专业：___大气科学___

出生年月：___1986 年 11 月___

工作单位：___清华大学地球系统科学系___

电子邮箱：___ 电话：___

我郑重推荐___王勇___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：___赵传峰___

推荐人单位公章：

2021 年 11 月 24 日



推荐人姓名：___赵传峰___ 专业技术职务：___教授___ 专业：___大气科学___

工作单位：___北京师范大学___

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 重点科研院所院（所）长

杰出青年基金获得者或与之相当的人才计划学者 国家重大科技项目首席科学家

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。

被推荐人主要科技成果

1. 解决了“小雨模拟过多大雨模拟不足”问题，揭示了小雨主导气溶胶长期湿清除过程，通过降低小雨发生频率改进了气溶胶模拟

被推荐人通过随机对流参数化方案改进的降水强度谱，在美国 NCAR 的 CESM 和美国能源部的 E3SM 模式中揭示了小雨对气溶胶长期湿清除的主导影响。当小雨（1 到 20 毫米/天）过多的发生频率得到有效地降低，这使得气溶胶浓度全球性的增加，该现象在热带和副热带地区表现得尤为明显。与气溶胶观测相比，模式严重低估的气溶胶光学厚度模拟大幅提升（Wang et al., 2021, Nature Geoscience; Wang et al., 2021, ACP）。

科学价值：

- 该工作被国内外各新闻网站报道，被美国能源部作为亮点论文介绍：首次揭示小雨主导气溶胶长期湿清除特征，为气候变化（小雨减少强降水增加）对污染的影响提供重要的启示。

2. 研发了基于经典冰晶核化理论的混合云沙尘和黑碳气溶胶冰晶异质核化新参数化方案，改进了云模拟

被推荐人研发了基于经典随机冰晶异质核化理论考虑沙尘和黑碳作为冰凝结核的冰晶异质核化参数化方案（Wang et al. 2014, ACP; Wang and Liu, 2014, ERL）。该方案提高了全球气候模式低估的混合云中云水含量和改进了其季节变化模拟（Wang et al. 2018, JGR-A）。被推荐人方案模拟的核化冰晶数浓度较其他国际上最新的方案更接近核化冰晶数浓度的观测（图 1）。

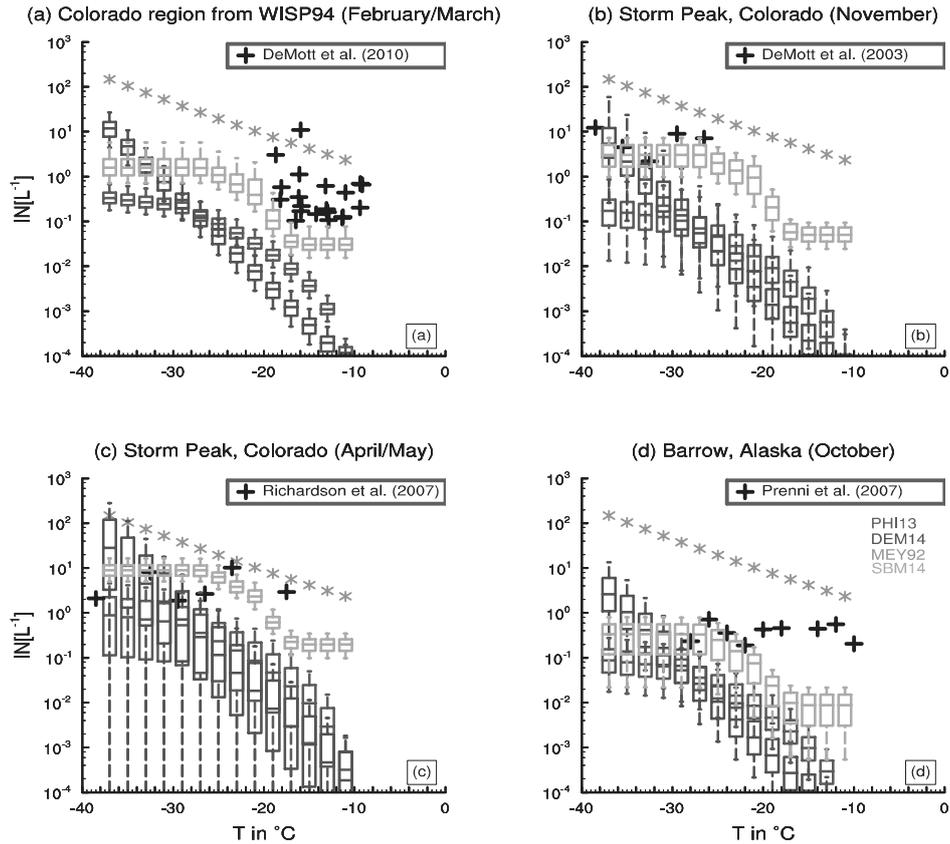


图 1 四个区域观测和冰晶核化方案模拟的核化冰晶数浓度。横坐标是温度，纵坐标是核化冰晶数浓度；黑色加号是观测、蓝色盒须图来自 DeMott et al. (2014) 参数化方案、绿色盒须图来自 Meyers et al. (1992) 参数化方案（其核化冰晶数浓度仅是温度的函数）、红色盒须图来自 Phillips et al. (2013) 参数化方案以及橘黄色盒须图来自被推荐人方案（Wang and Liu, 2014, ERL）。

科学价值：

- 被推荐人发展的方案已被美国国家大气研究中心 (NCAR) 的地球系统模式 CESM2、美国能源部 (DOE) 的地球系统模式 E3SMv1、挪威的地球系统模式 NorESM 采用作为默认方案 (Danabasoglu et al., 2020, JAMES; Rasch et al., 2019, JAMES; Kirkevåg et al., 2018, GMD);

- 著名的云微物理专家 Gettelman 教授在 CAM6 中发现新方案能显著改进南大洋云模拟 (Gettelman et al., 2020, JGR-A)。Zhang et al. (2019, JAMES) 发现采用了新冰晶核化方案的 E3SMv1 较上一版本模式在云水含量和云与气溶胶相互作用模拟方面改进明显。

3. 通过改进随机对流参数化方案和随机采样参数化次网格陆面给大气热通量非均一性，改进了降水模拟

被推荐人基于 Plant and Craig (2008)对流随机模型，在著名的 Zhang-McFarlane (1995) 积云对流参数化方案中参数化对流随机性 (Wang et al., 2016, GRL)。考虑了对流随机性的参数化方案使得 NCAR CAM5 和 DOE EAMv1 两个模式显著提高了低估的降水天气尺度和季节内尺度变率 (Wang et al., 2016, GRL; Wang et al., 2021, GMD); 极大程度解决了全球气候模式普遍存在的“小雨模拟过多大雨模拟不足”问题 (Wang et al., 2016, GRL; Wang et al., 2021, GMD; Wang et al., 2021, Nature Geoscience); 不同水平分辨率下全球 (尤其是中国) 极端降水模拟大幅改进 (Wang et al., 2017; JGR-A); 同时在可降水量以及云辐射强迫等方面也有不同程度的改进 (Wang and Zhang, 2016, JAMES)。之后，被推荐人进一步改进了随机对流参数化方案，南亚夏季季风降水进一步改进 (Wang et al., 2018, JC)。

被推荐人研发了一套次网格陆面给大气热通量非均一性参数化方案，基于随机采样和内集合方法考虑了其对对流和边界层非均一性影响 (Sun, Wang and Wang* et al., 2021, GRL)。该方案在 NCAR CESM 模式中改进了全球夏季降水模拟，尤其是很大程度消除了 CMIP5&6 多模式在中国区域表现的中国南 (北) 方降水模拟干 (湿) 偏差。

被推荐人的随机对流参数化方案极大程度解决了至今仍困扰 CMIP6 全球气候模式的“小雨模拟过多大雨模拟不足”问题 (图 2); 被推荐人首次在全球气候模式中考虑次网格陆气热通量非均一性;

推荐理由：

吴成来博士一直致力于地球系统模式中大气气溶胶模式的发展、气溶胶与地球系统各圈层的相互作用等领域的研究。目前是中国科学院地球系统模式 CAS-ESM 的核心研发成员，“十二五”国家重大科技基础设施“地球系统数值模拟装置”气溶胶与大气化学模式分系统负责人，同时担任科技部国家重点研发计划项目课题“新一代全球高精度大气化学模式研制”的课题负责人。他在我国自主起沙模型的研制及其在中国科学院地球系统模式（CAS-ESM）的耦合、全球和东亚沙尘循环、气溶胶-气候相互作用、CAS-ESM 的历史模拟和未来预估等方面取得了重要成果。研究成果为沙尘暴防治、生态文明建设及全球气候环境治理等国家战略提供科学支撑。近年来他的主要研究成果包括：

（1）自主构建了风蚀动力学起沙模型并耦合到 CAS-ESM 中

沙尘气溶胶是最主要的自然气溶胶。针对关键的起沙过程，基于风蚀起沙物理学理论自主构建了可充分考虑复杂多变下垫面影响的起沙模型，并通过与陆面过程模式 CoLM、动态植被模式、大气模式的耦合，构建了包含沙尘-气候-植被间相互作用的中国科学院地球系统模式新版本 CAS-ESM2（Wu et al., 2021）。相比于国外模型，该模型可考虑土壤沙粒的轰击运动、土壤团聚体的破裂作用，以及精细地表土壤和植被特征对起沙的影响，具有坚实的风沙物理学基础（Wu et al., 2016, 2021）。

基于上述耦合起沙模型的 CAS-ESM2 能很好地模拟出全球主要的沙尘源地和沙尘空间分布；模式也能合理地模拟出东亚沙尘活动的季节变化特征。与 NCAR 通用地球系统模式（CESM2）相比，CAS-ESM2 在全球沙尘气溶胶分布、沙尘气溶胶光学厚度等方面的模拟均明显优于 CESM2，尤其是克服了 CESM2 对我国西北塔克拉玛干沙漠、北非东部沙尘浓度高估的系统性偏差（Wu et al., 2021），表明 CAS-ESM2 对全球沙尘循环的模拟已处于国际先进水平。

该起沙模型是 CAS-ESM2 的重要发展之一（Zhang et al., 2020），已经作为 CAS-ESM2 的标准设置参加第六次国际耦合比较计划（CMIP6）。研究成果作为大气物理所十三五重大突破“地球系统模式发展与全球变化研究”的重要内容。该突破方向成果在中国科学院“率先行动”第一阶段评估中，获得优秀（附件 1）。另外起沙模块部分代码已被国际上权威的气象-化学耦合模式 WRF-Chem 所采用（附件 2）。

(2) 揭示了全球和东亚沙尘循环的演变特征

系统分析了地球系统模式对全球循环的模拟结果，完整给出了全球沙尘循环的特征及其不确定性 (Wu et al., 2020)。指出不同模式模拟的全球总起沙量变化为 7~82 亿吨/年，差别 10 倍以上；如果考虑相同粒径的起沙量，差别为 4~5 倍。沙尘沉降以干沉降为主 (占总沉降 61~88%)，沙尘平均生命期为 1.3~4.4 天。进一步指出不同模式中起沙模型采用的沙尘粒径范围、以及植被覆盖和土壤湿度等要素对起沙的参数化方案等影响很大，是造成模式起沙模拟不确定性的主要来源。

在东亚地区，过去 50 多年来，中国区域沙尘活动整体上呈减弱的趋势，然而当前大多数地球 (气候) 系统模式还不能模拟出 1960 年代以来东亚沙尘活动减弱的特征，或减弱趋势偏小，或呈现增加趋势 (Wu et al., 2018a)。这种偏差的原因主要是由于模式不能较好地再现过去风速和土壤湿度等的变化特征，另外也与模式对生态工程等人类活动影响的考虑不足有关。

上述研究结果对于深入理解沙尘气溶胶气候效应的不确定性有重要作用，为沙尘气溶胶模式的改进和完善指明了方向。研究结果发表后受到国内外同行的广泛关注，其中 Wu et al. (2020) 发表 1 年来已被他引 16 次 (Google Scholar)，包括《Science Advances》、《The Annual Review of Marine Science》等顶尖期刊的文章对本研究进行了积极的评价和充分的肯定。

(3) 阐明了沙尘和黑碳气溶胶沉降对高海拔地区能量和水分循环的影响

利用先进的全球变分辨率模拟技术 (Variable-resolution)，实现了地球系统模式框架下北美落基山的高分辨率模拟，揭示了模式分辨率的提高对复杂地形下降水和积雪时空演变、极端降水事件模拟的改进 (Wu et al., 2017)，并进而定量给出了沙尘和黑碳气溶胶沉降对落基山地区能量和水分循环的影响 (Wu et al., 2018b)。研究发现，雪中沙尘和黑碳通过改变地表反照率，改变地面辐射平衡，从而对地面温度、积雪雪深、积雪覆盖和径流均有显著的影响，研究同时也指出了沙尘在其中的重要贡献。

进一步利用上述先进的高分辨率模拟技术对青藏高原地区进行模拟，显著改进了对青藏高原复杂地形下温度、降水特别是积雪时空演变的模拟 (Rahimi et al., 2019a)，并量化了雪上气溶胶沉降对青藏高原积雪的影响 (Rahimi et al., 2019b)。该研究结果提升了气溶胶-积雪-辐射-气候相互作用的认识，具有重要的科学意义。

(4) 发展了适用于 CAS-ESM 的人为气溶胶及其前体物排放前处理模块

发展了适用于 CAS-ESM 模式的人为气溶胶及其前体物排放前处理模块，包括历史排放和 4 种未来共享社会经济情景，使得 CAS-ESM2.0 能计算人为气溶胶的历史演变和未来变化。作为主要完成人之一，完成了 CAS-ESM2.0 参加 CMIP6 的工业革命前、历史气候模拟和未来预估试验 (Zhang et al., 2020)。

CAS-ESM2.0 模拟和预估数据可用于全球气候变化研究、支撑有关应对气候变化的减排和适应策略制定。作为我国参与全球气候变化研究和气候环境治理的重要贡献，这些数据已经提交到 CMIP6 指定平台 (附件 3)，供全球学者、政策制定者及其他相关人员下载使用。

代表性论文:

- [1] **Wu, C.**, Lin, Z., Liu, X., Ji, D., Zhang, H., Li, C., and Lin, G.: Description of Dust Emission Parameterization in CAS-ESM2 and Its Simulation of Global Dust Cycle and East Asian Dust Events, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13, e2020MS002456, <https://doi.org/10.1029/2020MS002456>, 2021.
- [2] **Wu, C.**, Lin, Z., and Liu, X.: The global dust cycle and uncertainty in CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5) models, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 10401-10425, 10.5194/acp-20-10401-2020, 2020.
- [3] **Wu, C.**, Lin, Z., Liu, X., Li, Y., Lu, Z., and Wu, M.: Can Climate Models Reproduce the Decadal Change of Dust Aerosol in East Asia?, *Geophys Res Lett*, 45, 9953-9962, 10.1029/2018gl079376, 2018a.
- [4] **Wu, C.**, Liu, X., Lin, Z., Rahimi-Esfarjani, S. R., and Lu, Z.: Impacts of absorbing aerosol deposition on snowpack and hydrologic cycle in the Rocky Mountain region based on variable-resolution CESM (VR-CESM) simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 511-533, 10.5194/acp-18-511-2018, 2018b.
- [5] **Wu, C.**, Liu, X., Lin, Z., Rhoades, A. M., Ullrich, P. A., Zarzycki, C. M., Lu, Z., and Rahimi-Esfarjani, S. R.: Exploring a Variable-Resolution Approach for Simulating Regional Climate in the Rocky Mountain Region Using the VR-CESM, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 10,939-910,965, 10.1002/2017JD027008, 2017.
- [6] **Wu, C.**, Lin, Z., He, J., Zhang, M., Liu, X., Zhang, R., and Brown, H.: A process-oriented evaluation of dust emission parameterizations in CESM: Simulation of a typical severe dust storm in East Asia, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8, 1432-1452,

10.1002/2016MS000723, 2016.

- [7] Zhang, H., Zhang, M., Jin, J., Fei, K., Ji, D., **Wu, C.**, Zhu, J., He, J., Chai, Z., Xie, J., Dong, X., Zhang, D., et al.: Description and Climate Simulation Performance of CAS-ESM Version 2, *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2020MS002210, <https://doi.org/10.1029/2020MS002210>, 2020.
- [8] Rahimi, S. R., **Wu, C.**, Liu, X., and Brown, H.: Exploring a Variable-Resolution Approach for Simulating Regional Climate Over the Tibetan Plateau Using VR-CESM, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124, 4490-4513, 10.1029/2018jd028925, 2019a.
- [9] Rahimi, S., Liu, X., **Wu, C.**, Lau, W. K., Brown, H., Wu, M., and Qian, Y.: Quantifying snow darkening and atmospheric radiative effects of black carbon and dust on the South Asian monsoon and hydrological cycle: experiments using variable-resolution CESM, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 12025-12049, 10.5194/acp-19-12025-2019, 2019b.

附件清单:

附件 1: CAS-ESM 团队“率先行动”优秀荣誉证书

附件 2: 起沙模块代码被美国大气科学研究中心 (NCAR) 的 WRF-Chem 采用的证明

附件 3: CAS-ESM 模拟和预估数据提交第六次耦合模式比较计划 (CMIP6) 证明

附件 4: 主持的科技部国家重点研发计划项目课题证明

附件 5: 主持的基金委面上项目证明

附件 6: 主持的基金委重点项目课题证明

附件 7: 代表性论文[1]

附件 8: 代表性论文[2]

附件 9: 代表性论文[3]

附件 10: 代表性论文[4]

附件 11: 代表性论文[5]

附件 12: 代表性论文[6]

附件 13: 代表性论文[7]

附件 14: 代表性论文[8]

附件 15: 代表性论文[9]

2021 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： 尹志聪 专业技术职务： 教授 专业： 气象学

出生年月： 1984 年 9 月 6 日

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 尹志聪 教授 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。



推荐人姓名： 王会军 专业技术职务： 教授/院士 专业： 气象学

工作单位： 南京信息工程大学 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 重点科研院所院（所）长

杰出青年基金获得者或与之相当的人才计划学者 国家重大科技项目首席科学家

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。

科技成果简介

在全球变暖的大背景下，中高纬气候变率增强，破纪录的气候距平频现，对中国东部的极端气候事件和大气污染有显著影响。从多圈层、多时间尺度探讨中高纬气候系统变异影响大气污染的物理机制，能够深化对气候系统内部作用机制的认识。

申请人尹志聪，现任南京信息工程大学大气科学学院教授。在近五年，申请人基于观测和大样本、多模式数值模拟开展了**中高纬气候系统变异影响大气污染的机制研究**，取得了一些创新性成果，主要学术贡献包括：（1）揭示了北极多年海冰融化导致其年际和次季节变率增强，进而调控中国大气污染的物理机制；（2）揭示了欧亚积雪和太平洋海温影响大气污染年际-年代际变化的物理机制；（3）量化了中高纬因子调控大气污染的贡献，率先研发了短期气候预测模型，开展了大气污染实时预测。申请人已发表学术论文 54 篇，其中 SCI 论文 36 篇（含**第一/通讯作者发表 SCI 论文 30 篇**）。有 20 篇第一/通讯作者论文发表在 *National Science Review*, *Atmos. Chem. Phys.* 和 *Journal of Climate* 等 SCI 一区期刊。截至 2021 年 5 月，申请人已发表论文总被引 735 次，其中被 SCI 引用 364 次；被他引 606 次，其中被 SCI 他引 250 次。

代表性成果：

1. 揭示了北极多年海冰融化导致其年际和次季节变率增强，进而调控中国大气污染的物理机制。相关物理机制的解释具有较好的创新性。

1.1 基于 **CMIP6 模拟**和观测资料发现，晚秋初冬巴伦支海和喀拉海**海冰的次季节变化**不仅与 2020/21 年冬季中国东部破纪录寒潮（前冬）和暖事件（后冬）有密切联系，还直接导致了 **2021 年春季的华北超级沙尘暴**。2020 年晚秋初冬海冰的快速变化导致蒙古国前后冬温度出现了 1979 年以来的最强反转。前冬持续的低温导致更深的冻土层，后冬持续偏高的温度异常导致土壤解冻后失墒较快、土质变得更加疏松和裸露，为超级沙尘暴提供了异常充足的沙源。

1.2 基于地球系统模式 **CESM 集合模拟**和观测资料发现，不同扇区的海冰异常对**华北霾污染**的影响有次季节尺度差异。北极深处**多年海冰融化**（多年冰变为一年或季节性冰）导致前秋波弗特海海冰年际变率增大，在 90 年代后期可以通过北太平洋暖洋面增多华北前冬霾日数；与之不同，晚秋初冬楚科奇海的海冰通过辐射冷却作用增大北太平洋 SST 经向梯度，增强的热成风效应激发出类似 Rossby 波的大气环流异常，造成后冬霾日数增多。

1.3 基于气候模式 **CAM** 和大气化学模式 **GEOS-Chem** 和观测资料发现，在全球变暖的背景下 5 月约瑟夫岛附近（~80°N）海冰异常在夏季大气环流中激发出异常响应，该响应在 90 年代后期出现显著的**年代际增强**。大气环流异常引起光化学反应和自然前体物释放在华北和珠三角的反向变化，导致了**中国东部臭氧污染**的偶极型分布。

2. 揭示了前期欧亚积雪和太平洋海温影响大气污染年际-年代际变化的物理机制。该工作将预测大气污染的有效信号向前提了一个季度。

2.1 晚秋东欧-西西伯利亚地区的积雪对局地土壤水分和地表辐射有显著影响，并且在 90 年代中期之后发生年代际增强。增加的土壤水分和增强的辐射冷却作用共同在华北上空诱发异常反气旋环流，导致大气扩散条件变差、霾天气频繁发生。在全球变暖的背景下，4-5 月欧亚大陆密实雪线在 90 年代中期之后北移 2 个纬度，对 EU 遥相关型的激发作用和对华北夏季臭氧的影响明显减弱，这与 90 年代之前是明显不同的。

2.2 基于地球系统模式 CESM 和观测资料发现，前秋阿拉斯加湾和白令海域偏暖的洋面通过加热大气可以在前冬对流层激发出 Rossby 波列型的响应，促进霾天气的发生。与之不同，前冬北太平洋 SST 经向梯度正异常可以通过热成风效应激发出类似 Rossby 波的结构，造成后冬霾污染多发。2020 年秋季，西北大西洋 SST 为 1979 年以来最暖，引起极涡减弱和乌拉尔阻高增强，导致蒙古国冬季降水减少、土壤干化、植被稀少，强化了超级沙尘暴所需的沙源。

3. 量化了中高纬因子调控大气污染的贡献，率先研发了短期气候预测模型，开展了大气污染实时预测，获得了良好的社会经济效益。

3.1 发现华北霾日数在 2010 年之前缓慢下降和之后迅速增加的现象与气象条件的变化一致，也与多个前期外强迫因子的变化一致。揭示出气候变异不仅加速了近几年华北霾污染的恶化，而且在 2010 年之前掩盖了大规模治污减排的紧迫性。同时，量化出多个前期中高纬驱动因子可以解释了华北霾大约 64% 的年际-年代际变化，其中北太平洋海温和北极海冰异常的综合贡献最大。2007 年之后，各因子频繁表现为同向调控效用，在人为排放没有突变的情况下，导致极端霾污染事件频发。

3.2 在基本厘清大气污染的规律和调控因子后，基于动力和统计相结合的方法建立了冬季霾和夏季臭氧污染的短期气候预测模型，对趋势变化、转折点、距平同号率均有很好的把握。2016 年开始，针对京津冀和长三角冬季霾污染开展实时气候预测，通过决策咨询报告将预测结论和科学建议上报到中央办公厅、国务院办公厅和江苏省政府，支撑了重要政府决策。

此外，申请人作为协调人参与撰写《中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告》；作为主要作者参与撰写《中国气候与生态环境演变：2021》第一卷、综合卷；作为主要作者参与撰写《“一带一路”区域气候变化灾害风险》，为“碳达峰、碳中和”以及“一带一路”提供了科技支撑。

2021 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： 朱佳雷 专业技术职务： 教授 专业： 大气科学

出生年月： 1989 年 6 月

工作单位： 天津大学地球系统科学学院

电子邮箱： _____ 电话： _____

我郑重推荐 朱佳雷 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：

2021 年 11 月 9 日



推荐人姓名：刘丛强 专业技术职务：院士 专业：地球科学

工作单位：天津大学地球系统科学学院

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 重点科研院所院（所）长

杰出青年基金获得者或与之相当的人才计划学者 国家重大科技项目首席科学家

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。

二次有机气溶胶（SOA）是大气亚微米气溶胶的主要组成成分，在全球有机气溶胶中占比最大，是影响全球空气质量和气候变化的重要因素之一。然而，SOA 来源和组成成分多样，形成机制及理化性质复杂，SOA 的数值模拟研究存在较大挑战和不确定性。

近年来，被推荐人朱佳雷围绕“**二次有机气溶胶形成机制与辐射效应**”开展研究，致力于在地球系统模式中建立和发展 SOA 形成的化学机制、物理过程以及 SOA 气候效应的数值模拟方法，并应用于定量评估 SOA 对全球气候变化的作用（图 1 所示）。其研究成果以第一作者在包括 *Nature Communications*, *PNAS* 等一流刊物中发表论文 11 篇，论文发表总数 32 篇，引用 1100 余次（其中他引 900 余次），研究成果被 IPCC 第六次气候变化评估报告（AR6）多处引用；受邀参与加拿大气象与海洋学会会士 Douw G. Steyn 教授著作 *Air Pollution Modeling and its Application* 和美国地球物理学会会士 Greg Carmicheal 教授著作 *Air pollution, climate and health* 章节的编写。主持过包括国家自然科学基金委面上项目等三项科研项目，作为核心成员参与了包括美国国家科学基金委（NSF）、美国国家航空航天局（NASA）以及国家 973 课题等多项重大科学研究工作。

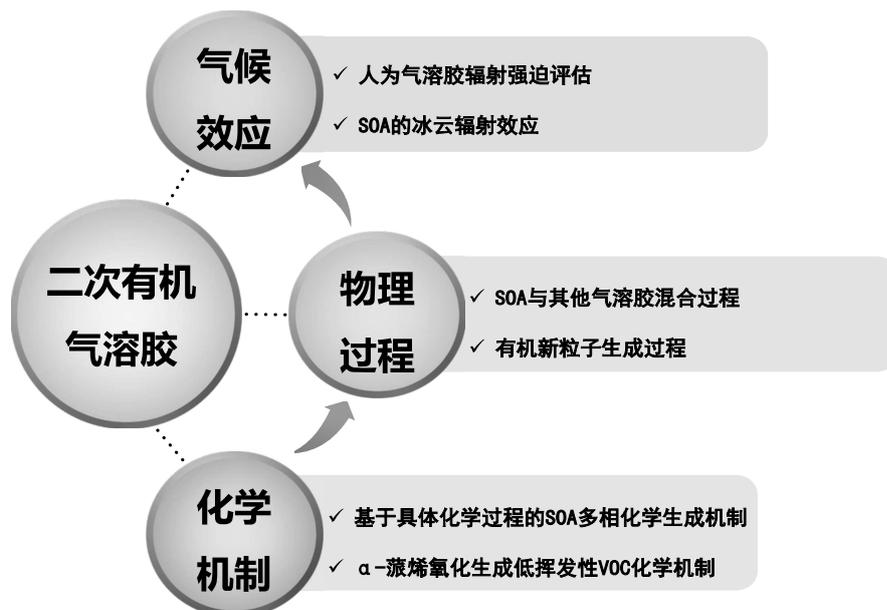


图 1. 被推荐人对全球 SOA 形成机制和辐射效应研究的主要贡献

被推荐人在 SOA 形成机制和辐射效应研究中取得的主要成果及其创新性、科学价值简述如下：

(1) 建立了 SOA 通过热力、动力及液相过程与其他气溶胶内部混合机制的数值模拟方法，纠正了地球系统模式中 SOA 外部混合的假设，提高了未来气候预测的准确性

被推荐人在地球系统模式 CESM/IMPACT 中基于现有实验和理论研究基础建立了包含 800 余个多相大气化学反应，35 种(类)SOA 的化学生成机制，并根据 SOA 的不同形成机制，分别通过热力、动力以及液相过程，实现不同类型 SOA 与其他气溶胶内部混合过程的模拟(图 2)，从而提高地球系统模式中 SOA 光学性质、粒径分布、吸湿能力和沉降效率的模拟准确性。通过数值模拟研究发现：(a) 过去的模式中 SOA 外部混合的假设显著高估了 SOA 散射辐射和形成云凝结核(CCN)的能力。(b) 考虑 SOA 复杂的内部混合机制后，SOA 在未来情景下将有比之前预期更强的降温效应。相关研究成果以第一作者发表于美国科学院院刊 *PNAS*(Zhu et al. 2017,代表作 1)。美国气溶胶学会前主任、普渡大学 Alexander Laskin 教授等在大气环境多相化学领域著作 *Multiphase Environmental Chemistry in the Atmosphere* 中引用本研究工作，阐述大气模型不应仅局限于重现气溶胶的质量浓度，也要关注对气溶胶-辐射相互作用有决定性作用的气溶胶混合状态、粒径分布等重要物理性质。

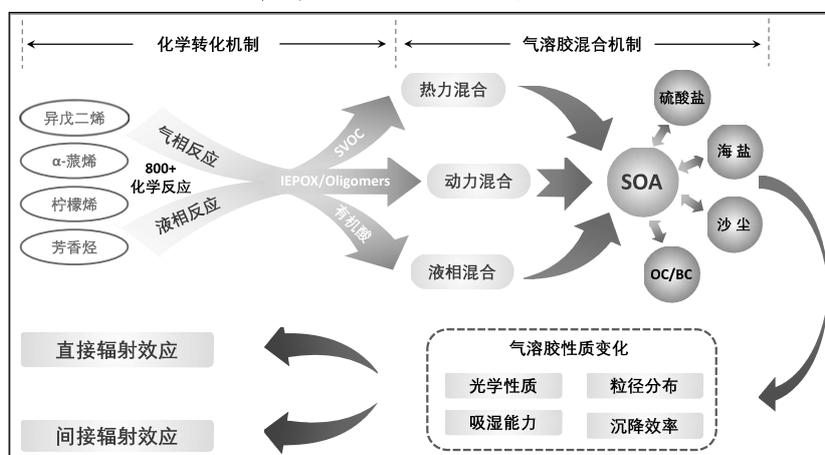


图 2. 被推荐人发展的 SOA 形成和混合机制示意图

(2) 创建了基于化学机制的有机新粒子多途径生成过程的数值模拟方法，揭示有机新粒子对人为气溶胶辐射强迫评估的重要作用

被推荐人基于多项有机新粒子生成机制的实验研究结果，在 CESM/IMPACT 地球系统模式中发展了包含 40 个气相化学反应的 α -萜烯氧化生成高氧化有机分子 (HOMs) 的化学机制，并进一步提出了 HOMs 通过有机物-硫酸异质成核、中性纯有机成核、离子诱导纯有机成核三种途径生成有机新粒子的模拟方案，使得地球系统模式首次具备基于具体化学机制模拟有机新粒子生成过程的能力 (图 3)。

研究发现： (a) 有机新粒子生成过程可显著提升模式对多数站点的气溶胶数浓度的模拟能力，特别是解决了长期以来模式对亚马逊地区高空气溶胶数浓度低估 1-2 个数量级的问题。 (b) 有机新粒子生成机制的提出显著改变了之前对地球上气溶胶数浓度背景值的认识。研究成果提高了人类活动对全球气候变化贡献认识的准确性，揭示了自然因素对气候变化的作用机制。研究成果以第一作者发表于 *Nature Communications* (Zhu et al., 2019, 代表作 2)。被推荐人进一步开展大量有机新粒子生成机制的敏感性试验分析，进一步提高了 SOA 数值模拟的准确性，阐明了 SOA 形成机制的重要影响因素，提出了未来 SOA 数值模拟研究发展的探索方向。研究成果以第一作者发表于 *Journal of geophysical research-atmospheres* (Zhu&Penner, 2019, 代表作 3)。

英国皇家科学院院士 John Pyle 团队的论文 (Weber et al., 2020) 6 处长篇引用本研究成果，论述大气化学机制、气溶胶粒径分布、新粒子生成和增长机制等因素都是气溶胶辐射强迫计算重要参数，认为本研究提出的人为气溶胶辐射强迫一直以来被高估是一个重要的结论。其研究成果还受到国际知名科学资讯媒体 *Phys. Org* 以“大气科学家发现气候变化新线索”为题的采访报道。

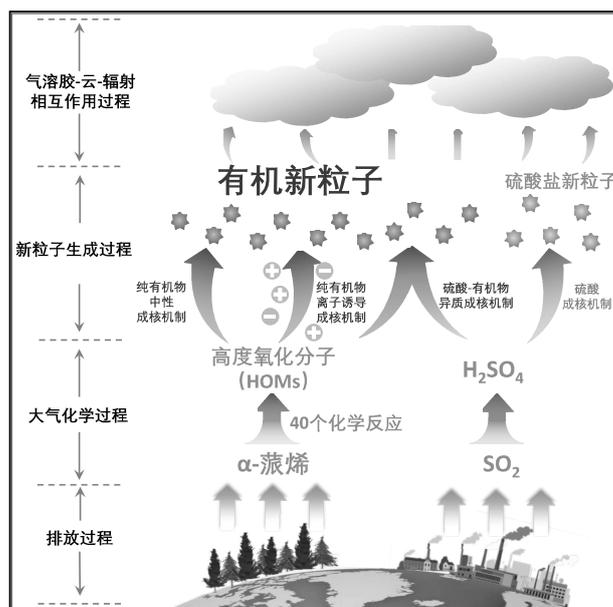


图 3. 被推荐人发展的有机新粒子生成机制及其辐射效应示意图

(3) 创新了地球系统模式中气溶胶冰核效应的数值模拟方法，阐明了 SOA 的冰云间接辐射效应及其敏感性，降低了气溶胶冰云辐射强迫评估的不确定性

被推荐人发展了一套表述气溶胶冰核效应的新模拟方案（HYBRID 方案），在地球系统模式中表述气溶胶冰核效应对水汽竞争关系和大气重力波的影响，提升了气溶胶冰云效应评估的准确性和科学性（图 4）。新的模拟方案发表于 *Atmospheric Chemistry and Physics* 杂志（Zhu&Penner, 2020，代表作 4），并应用于重新评估了工业革命以来人为气溶胶的冰云辐射效应。此外，被推荐人还在地球系统模式中发展了 SOA 作为冰核参与冰云冰晶形成过程的模拟方案，并采用了基于 SOA 形成和增长理化过程模拟得到的 SOA 粒径分布，取代了以往模式中根据经验值假设固定的 SOA 粒径分布，对 SOA 的冰云辐射效应进行定量评估。研究结果定量评估了 SOA 的冰云间接效应及其影响，揭示了气溶胶模式中粒径分布模拟的重要性。研究结果已发表于 *Journal of geophysical research-atmospheres* 杂志（Zhu&Penner, 2020，代表作 5）。



图 4. 被推荐人对气溶胶冰云效应模拟机制的发展示意图

综上所述，朱佳雷在 SOA 形成机制及其辐射效应方面系列研究成果，在地球系统模式中揭示了 SOA 混合机制、有机新粒子生成机制、SOA 冰云效应对评估气溶胶辐射强迫以及气候变化成因的重要影响，推动了表述 SOA 物理性质、化学生成机制和 SOA-云-辐射相互作用的数值模型发展，极大地提高了地球系统模式对 SOA 理化性质和辐射效应的模拟能力。通过 SOA 模拟方案的发展，降低了 SOA 以及人为气溶胶辐射效应评估的不确定性，加深了对气候变化归因的认识，也为未来气溶胶辐射效应的评估以及气候变化的预测提供了重要的研究方法和科学依据。

代表作 1: Zhu, J., Penner, J. E., Lin, G., Zhou, C., Xu, L., & Zhuang, B. (2017). Mechanism of SOA formation determines magnitude of radiative effects. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 114(48), 12685-12690.

代表作 2: Zhu, J., Penner, J. E., Yu, F., Sillman, S., Andreae, M. O., & Coe, H. (2019). Decrease in radiative forcing by organic aerosol nucleation, climate, and land use change. *Nature Communications*, 10(1), 423.

代表作 3: Zhu, J., & Penner, J. E. (2019). Global Modeling of Secondary Organic Aerosol With Organic Nucleation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(14), 8260-8286.

代表作 4: Zhu, J., & Penner, J. E. (2020). Radiative forcing of anthropogenic aerosols on cirrus clouds using a hybrid ice nucleation scheme. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(13), 7801-7827.

代表作 5: Zhu, J., & Penner, J. E. (2020). Indirect Effects of Secondary Organic Aerosol on Cirrus Clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(7).