

## 2025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：\_\_\_\_\_金建炳\_\_\_\_\_ 专业技术职务：\_\_\_\_教授\_\_\_\_  
专业：\_\_\_\_\_大气化学数据同化与人工智能\_\_\_\_\_

出生年月：\_\_\_\_\_1990年2月9日\_\_\_\_\_

工作单位：\_\_\_\_\_南京信息工程大学\_\_\_\_\_

电子邮箱：\_\_\_\_\_jianbing.jin@nuist.edu.cn\_\_\_\_\_

我郑重推荐\_\_金建炳\_\_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。



沈学顺

2026年1月5日

推荐人姓名：\_\_沈学顺\_\_ 专业技术职务：\_\_研究员\_\_ 专业：\_\_数值天气预报\_\_  
工作单位：\_\_\_\_\_中国气象局地球系统数值预报中心\_\_\_\_\_

电子邮箱：\_\_\_\_\_shenxs@cma.gov.cn\_\_\_\_\_

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。

## 推荐理由

申请人金建炳 2019 年在荷兰代尔夫特理工大学应用数学系获得博士学位，现任南京信息工程大学教授、博导。他的研究围绕沙尘天气同化预报系统、大气化学人工智能建模、大气污染物再分析数据集三个方向开展，发表第一/通信作者论文 21 篇，包括地球模式开发 Top 期刊《Geoscientific Model Development》和《Journal of Advances in Modeling Earth Systems》7 篇，《Atmospheric Chemistry and Physics》6 篇，入选国家海外高层次人才计划-工信部启明计划青年项目，主持科技部重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项、京津冀环境综合治理国家科技重大专项课题、国自然面上等多个项目。主要研究成果与价值包括：

### 一、沙尘天气数据同化预报系统

全球变暖背景下，蒙古高原春季降水大幅减少，蒙古国土地荒漠化加剧，跨境传输等沙尘天气愈发频繁，迫切需要高水平沙尘预报系统。申请人开发了沙尘同化预报系统 DAPS，围绕系统构建、观测优化、同化算法设计进行了以下创新：

**系统构建：**设计了集合卡尔曼滤波、粒子滤波、四维集合变分等多种算法在内的同化开源软件 Pyfilter，编写了通用式数值模式通信与数据接口，最终建立了沙尘同化预报系统 DAPS，实现了对东亚沙尘天气同化高精度 24 小时预报（Pang and Jin\*, *Atmos. Environ.*, 2023）；设计了适用于非线性系统优化的减秩切线性四维变分同化（4DVar），实现了沙尘逐小时排放反演（Jin et al., *Atmos. Environ.*, 2018; Jin et al., *Atmos. Chem. Phys.*, 2022）；（3）编写了 LOTOS-EUROS 模式伴随算子，实现了沙尘高效溯源（Jin et al., *Atmos. Chem. Phys.*, 2020）。

**观测优化：**设计了基于机器学习的非沙尘组分偏差订正算法（Jin et al., *Atmos. Chem. Phys.*, 2019）；设计了 AOD 质量控制算法（Jin et al., *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 2019），有效去除卫星气溶胶光学观测因系统误差、云气溶胶误识别引起的污染数据；论证了传统 AOD/地面浓度观测同化的不足以及垂直廓线资料同化的重要性，设计了垂直局地化方案（Pang and Jin\*, *Geosci. Model. Dev.*, 2025）。

**同化算法：**提出了图形畸变数据同化的弱约束变分同化算法，实现了协同优化沙尘排放以及沙尘云位置（Jin et al., *Geosci. Model. Dev.*, 2021）；设计了基于有效时刻偏移同化算法（VTS-EnKF），综合优化了沙尘背景协方差矩阵对排放、长距离输送等多源误差的代表性（Pang and Jin\*, *Geosci. Model. Dev.*, 2024）。

## 研究价值

申请人自主开发的沙尘同化排放反演与预报系统DAPS, 以及多源观测协同同化、有效时刻偏移卡尔曼滤波、观测质量控制与偏差订正等关键技术, 克服了传统沙尘同化预报中起沙通量/沙源地时空变化高度不确定、长距离传输模拟误差累积、观测非沙尘组分偏差及覆盖率低等关键问题。申请人联合中国气象局地球系统数值预报中心和蒙古国气象局, 获批主持了国家重点研发计划-政府间国际科技创新合作重点专项《全球变暖背景下中国-蒙古沙尘预报预测预估系统》, DAPS系统已进入蒙古国气象局春季沙尘天气预报业务化应用, 服务于中蒙两国一带一路气象保障。观测偏差订正等关键技术被中国气象局地球系统数值预报中心纳入风云四星同化应用。DAPS被Nature专访报道, 并获得高度评价。

## 二、大气化学人工智能建模

申请人基于2D Swin Transformer + Unet 框架, 构建了“气象、排放、初始/边界场”到“浓度场”的人工智能预报大模型, 对大气污染物组分实现逐小时高分辨率超高效率模拟 (Pang and Jin\*, *arXiv*, 2025)。设计了基于集合高效特征提取算法的短时空空气质量机器学习预报系统RFSML, 通过区域随机SAGE高效提取关键预报因子, 实现了我国1600多处站点精确预报 (Fang and Jin\*, *Geosci. Model. Dev.*, 2022); 进一步通过EnKF同化方法融合RFSML和模式空间相关性信息, 实现了全国网格化空气质量高精度高效率预报 (Fang and Jin\*, *Geosci. Model. Dev.*, 2023)。设计了通过深度学习构建数值模式伴随算子的新方法 (Xiao and Jin\*, *Water Resour. Res.*, 2022)。

## 研究价值

一方面, 上述研究解决了传统大气化学正演模拟计算复杂度高、准确性低等局限, 为发展多圈层耦合地球系统数值模式提供了技术基础; 另一方面, 提出的 AI 模型自微分伴随算子方法, 克服了传统伴随模式编写成本高、部分物理/化学机制线性化难度大等挑战, 为发展全链条自主可控的地球系统人工智能建模与同化提供了新范式。

## 三、大气污染物再分析数据集

大气污染物各组分浓度及排放数据, 是认识我国大气污染演变特征、评估空气污染环境气候等效应、发展空气质量预报的前提。在该方向, 申请人设计了基于土地利用代表性偏差修订的观测算子, 利用卫星高分辨率夜间光亮度数据量化了网格内部的城乡比例, 建立了无偏的PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub>等大气污染物地面网格化观测数据集 (Fang and Jin\*, *Geosci. Model. Dev.*, 2024)。提出了同步同化AOD与Ångström协同约束气溶胶模拟场

的多维气溶胶卫星数据同化算法 (Jin et al., *Atmos. Chem. Phys.*, 2023)。通过同化IASI、TROPOMI 等卫星观测, 建立了我国氨气、NMVOCs、黑碳自上而下的反演排放清单 (Jin et al., *Envir. Res. Lett.*, 2023; Xia and Jin\*, *Atmos. Chem. Phys.*, 2025; Xu and Jin\*, *Atmos. Chem. Phys.*, 2026)。

### 研究价值

申请人提出多维气溶胶卫星数据同化算法、网格化地面观测算子及多要素大气成分排放反演等关键技术, 为未来建立我国大气化学成分全要素再分析数据集、化学天气等跨圈层耦合再分析数据集提供了基础。

## 2025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：\_\_\_李清亮\_\_\_ 专业技术职务：\_\_\_教授\_\_\_ 专业：\_\_\_人工智能\_\_\_

出生年月：\_\_\_\_\_ 1988年12月 \_\_\_\_\_

工作单位：\_\_\_\_\_ 长春师范大学，计算机科学与技术学院 \_\_\_\_\_

电子邮箱：\_\_\_\_\_ liqingliang@ccsfu.edu.cn \_\_\_\_\_

我郑重推荐\_\_\_李清亮\_\_\_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：大气科学学院  
2025年11月5日

推荐人姓名：\_\_\_戴永久\_\_\_ 专业技术职务：\_\_\_教授\_\_\_ 专业：\_\_\_大气科学\_\_\_

工作单位：\_\_\_\_\_ 中山大学，大气科学学院 \_\_\_\_\_

电子邮箱：\_\_\_\_\_ daiyj6@mail.sysu.edu.cn \_\_\_\_\_

推荐身份：

- |   |   |                                       |
|---|---|---------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> 中国科学院院士       | <input 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 checked="" 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 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。

李清亮博士一直从事天气/气候/地球系统模式（气象物理大模型）的重要分系统模式-陆面模式的人工智能研究。工作核心在于更好地刻画陆地表面的变化以及陆-气界面的物质和能量交换，以提升气象数值模式的整体性能，为我国天气预报和气候预测的人工智能研究，以及国家气象事业的发展提供科学支撑。在高分辨率和实时化要求下，传统模式难以兼顾精度与效率，须与 AI 深度融合，发挥“物理+数据”的互补优势。近年围绕 AI 驱动陆面过程模拟中**参数化方案经验性高、高分辨率数据缺失、AI 模型物理约束不足及可解释性差**三大核心问题展开系统性研究，他构建了高分辨率土壤湿度数据集及陆面要素模拟基准平台，并引入物理迁移学习、符号回归等新方法以增强 AI 模型的物理一致性、可解释性与跨区域泛化能力。相关工作形成互补支撑的研究体系（如图 1 所示），有效推动了陆面模式智能化方向的发展。作为第一作者或通信作者已发表 SCI 论文 27 篇（中科院一区论文第一作者 9 篇，通信作者 3 篇；2 篇为 ESI 高被引论文，其中 1 篇为 ESI 高被引热点论文），Google 引用 1243 次，曾获吉林省“优秀青年”基金资助，并授予吉林省首届“长白英才计划”青年拔尖人才等称号。

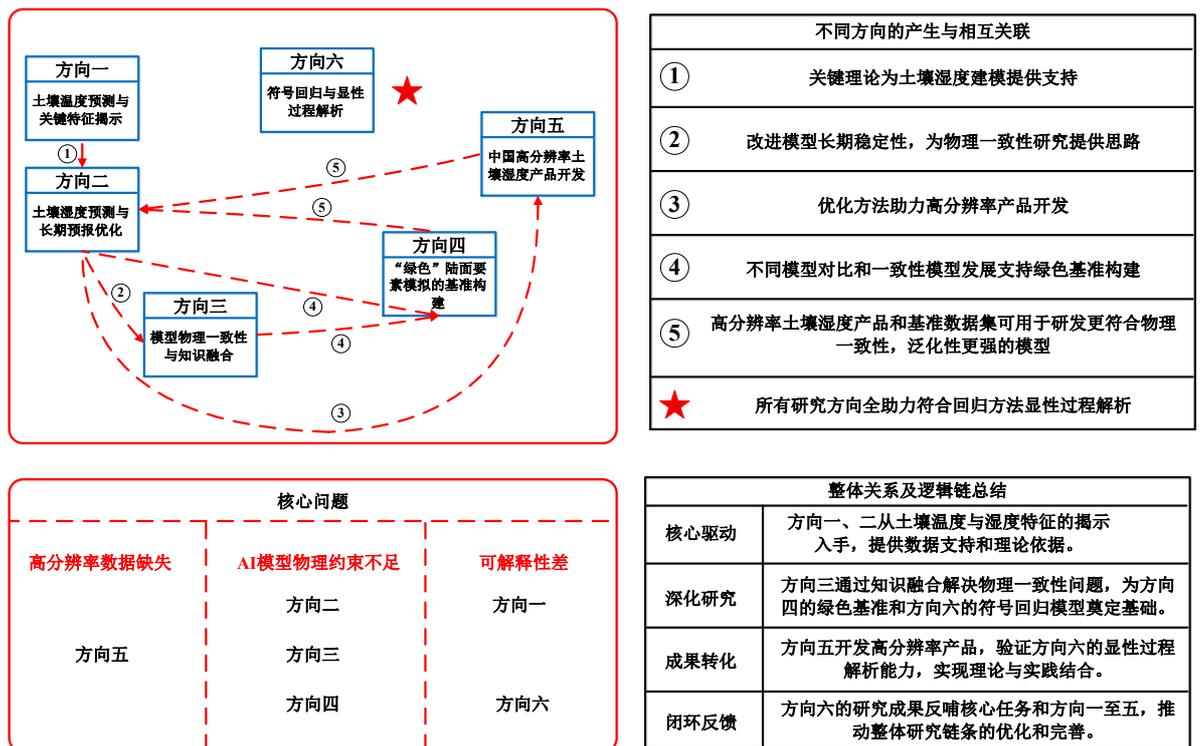


图 1 李清亮博士研究框架及互补支撑的综合研究体系说明

### (1) 高分辨率数据缺失

李清亮博士**解决**了中国**缺乏高分辨率、多层次、长时间序列的土壤水分数据产品的问题**。创新性地采用机器学习中的随机森林模型，结合 ERA5-Land 气象数据、MODIS 叶面积指数、地形和中国土壤数据库等多源高分辨率数据，并利用 1789 个实测站点的土壤水分数据进行训练，成功构建了中国范围内 1 公里分辨率、10 层（0-100 cm）、

逐日更新、时间跨度达 20 年的土壤水分数据集。其在时间和空间两个维度上均表现出优于其它国家现有产品（如 ERA5-Land、SMAP-L4、SoMo.ml）的精度优势。此成果不仅为干旱监测、农业灌溉优化等提供坚实的数据支撑，还助力碳循环评估和气候模型验证，是提升我国自然灾害防控能力的重要科技基础。该产品被国家青藏高原科学数据中心列为关键数据集（排名第一）和明星数据集，两年内下载量超过 1 万余次，相关成果被评为 ESI 高被引论文。

### （2）AI 模型物理约束不足

近年来，陆面过程的 AI 建模在国内外研究中蓬勃发展，但普遍面临研究范式碎片化、数据异构导致模型不可复现、训练离散性阻碍迭代升级，以及空间异质性限制泛化能力等核心难题。针对这些瓶颈，设计并开发了陆面要素模拟基准平台 LandBench 1.0，**填补陆面过程 AI 建模的关键空白，为后续跨学科融合研究提供了通用平台与方法论**。首先在**多源验证体系与算力优化**，集成土壤湿度、径流等核心变量的多源观测与模拟验证流程；将全球 0.5° 分辨率模拟的算力需求压缩至常规服务器的 10%，大幅降低部署门槛。在**时滞效应解析**方面，通过平台对比评估主流 AI 模型，系统揭示陆面要素中时滞效应对模型失效的关键影响；**机制融合算法**方面，在该平台基础上，候选人相继提出并实现了**物理信息迁移学习**：将已有物理模型参数融入预训练过程，提升小样本环境下的预测鲁棒性；**残差理论 Encoder-Decoder 架构**：利用残差连接强化模型对非线性过程的捕捉能力；**聚类平均采样策略**：针对空间异质性，通过聚类划分气候区并自适应采样，有效改善不同空间的迁移性能；**柯本气候分区元学习框架**：融合区域气候特征，实现跨区域快速适配；**水平衡知识引入损失函数**：将水量守恒约束纳入训练目标，显著提升预测物理一致性；LandBench 1.0 平台产生的一系列成果，**成功实现了未来一周土壤湿度的高精度预测，为中国气象局气候中心提供了可靠的决策支持**。

### （3）可解释性差

当前 AI “黑箱”模型**难以揭示物理过程机理，制约理论拓展与工程应用**。针对这一痛点，从可解释性与符号表达两大维度开展深入研究：**多层次注意力 LSTM 模型**，在经典时序 LSTM 基础上，设计了**多特征注意力、预测器注意力与时间注意力**三大模块；在多个 FLUXNET 观测站测试，表明该模型相比主流机器学习与深度学习方法，土壤温湿度预测精度提升 10% 以上，且跨气候区的泛化能力显著增强；通过注意力权重的可视化分析，定量验证模型对关键影响因子的选择与时序依赖的物理规律捕捉能力；破坏性实验进一步证明，剥离物理约束会导致性能大幅下滑，从侧面印证注意力机制对物理一致性的支撑作用。**知识引导的符号回归框架中，发展硬约束**：基于符号表达树的子过程分解规则与树深度限制，确保生成表达式严格遵循物理过程的因果逻

辑；**软约束**：引入符号长度惩罚与高斯分布先验，显著缩减搜索空间，提升收敛效率；**领域先验融合**：将成熟的物理公式作为附加输入，引导模型优先探索物理一致的表达式。该方法不仅成功推导出适用于 Penman–Monteith 蒸散过程的**显式解析表达式**，还在地表阻抗参数化中挖掘出新的物理关联，其模拟精度和物理一致性均领先于传统理论和现有 AI 技术。相关成果发表于 *npj Climate and Atmospheric Science* 和 *Geoderma* 等期刊，并被评 ESI 高被引论文与 ESI 热点论文。预示着人工智能在地球科学领域的应用前景广阔，尤其是在从观测数据中解码未知过程方面，不仅**推动了地球科学与人工智能的深度融合**，还为地球科学和信息科学的前沿发展注入了新的活力。

近五年发表论文列表（**第一作者或通信作者**）

ID	作者顺序	论文（蓝色字体为 ESI 高被引论文，红色字体为 ESI 高被引热点论文）
<b>中科院一区</b>		
1	<b>第一作者兼通信作者</b>	Improving Global Soil Moisture Prediction based on Meta-Learning Model Leveraging Köppen-Geiger Climate Classification. <i>Catena</i> , 2025, 250: 108743
2	<b>第一作者兼通信作者</b>	Advancing symbolic regression for earth science with a focus on evapotranspiration modeling. <i>npj Climate and Atmospheric Science</i> , 2024, 7: 321.
3	<b>第一作者兼通信作者</b>	Improving Global Soil Moisture Prediction through Cluster-Averaged Sampling Strategy. <i>Geoderma</i> , 2024, 639: 131521.
4	<b>第一作者兼通信作者</b>	LandBench 1.0: A benchmark dataset and evaluation metrics for data-driven land surface variables prediction. <i>Expert Systems with Applications</i> , 2023, 243(1):122917
5	<b>第一作者兼通信作者</b>	A novel local-global dependency deep learning model for soil mapping. <i>Geoderma</i> , 2023, 438:116649.
6	<b>第一作者</b>	<b>An attention-aware LSTM model for soil moisture and soil temperature prediction. <i>Geoderma</i>, 2022, 409(2):115651.</b>
7	<b>第一作者</b>	<b>A 1 km daily soil moisture dataset over China using in situ measurement and machine learning. <i>Earth System Science Data</i>, 2022, 14(12):5267-5286</b>
8	<b>第一作者</b>	Improving soil moisture prediction using a novel encoder-decoder model with residual learning. <i>Computers and Electronics in Agriculture</i> , 2022, 195(2):106816.
9	<b>第一作者</b>	Improved Daily SMAP Satellite Soil Moisture Prediction over China using deep learning model with transfer learning. <i>Journal of Hydrology</i> , 2021, 600(D20): 126698
10	通信作者	Meta-LSTM in hydrology: Advancing runoff predictions through model-agnostic meta-learning. <i>Journal of Hydrology</i> , 2024, 639:131521
11	通信作者	Dynamic sampling strategy for enhanced person re-Identification across multiple cameras. <i>Expert Systems with Applications</i> , 2025, 285: 128071.
12	通信作者	A novel diversity-aware sampling method for global soil moisture prediction.

		Journal of Hydrology, 2025, 662: 133851.
中科院二区		
13	第一作者	GANs-LSTM Model for Soil Temperature Estimation From Meteorological: A New Approach, IEEE Access, 2020,8: 59427-59443
14	第一作者	A Novel Multichannel Long Short-Term Memory Method With Time Series for Soil Temperature Modeling, IEEE Access, 2020,8:182026-182043
15	通信作者	Enhanced global soil moisture prediction through a sampling-weighted sensitive learning strategy applied to various LSTM-based models. Computers and Geosciences, 2025, 207:106068
16	通信作者	Camera-aware re-identification feature for multi-target multi-camera tracking. Image and Vision Computing, 2024, 142(6):104889.
17	通信作者	Soil Temperature Prediction Using Convolutional Neural Network Based on Ensemble Empirical Mode Decomposition, IEEE Access, 2021, 9: 4084-4096
中科院三区		
18	通信作者	Establishing a periodic SM model with Fourier analysis for enhancing global soil moisture forecasting. Scientific Reports, 2025,15:15962.
19	通信作者	Enhancing Data-Driven Soil Moisture Modeling with Physically-Guided LSTM Networks. Front. For. Glob. Change, 2024,7:1353011
20	通信作者	Enhancing Soil Moisture Forecasting Accuracy with REDF-LSTM: Integrating Residual En-Decoding and Feature Attention Mechanisms. Water, 2024,16(10):1376
21	通信作者	Soil temperature prediction based on Explainable Artificial Intelligence and LSTM. Front. Environ, 2024, 12:1353011.
22	通信作者	Few-shot SAR target classification via meta-learning with hybrid models. Front. Earth, 2024, 12:1469032
23	通信作者	Enhancing Hydrological Variable Prediction through Multitask LSTM Models. Water, 2024, 16: 2156.
24	通信作者	Interpretable spatio-temporal modeling for soil temperature prediction. Front. For. Glob. Change, 2024, 6:1295731.
25	通信作者	An Ensemble 3D Convolutional Neural Network for Spatiotemporal Soil Temperature Forecasting. Sustainability, 2021,13(16):9174.

## 2025 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：沈路路 专业技术职务：研究员 专业：大气科学

出生年月：1987 年 7 月 29 日

工作单位：北京大学物理学院大气与海洋科学系

电子邮箱：lshen@pku.edu.cn

我郑重推荐 沈路路 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：



2026 年 1 月 8 日

推荐人姓名：赵传峰 专业技术职务：教授 专业：大气物理

工作单位：北京大学物理学院大气与海洋科学系

电子邮箱：cfzhao@pku.edu.cn

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。

尊敬的“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”委员会：

我郑重推荐沈路路博士申请“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”。

候选人沈路路博士 2010 年本科毕业于北京大学，2012 年硕士毕业于清华大学，2017 年博士毕业于哈佛大学，现在是北京大学物理学院大气与海洋科学系的助理教授。候选人在北大工作期间已经主持了海外优青项目 1 项、面上项目 1 项、科技部重点研发课题 1 项(课题负责人)、生态环境部卫星中心的成果转化课题 1 项；迄今发表 SCI 论文 64 篇，其中 21 篇为第一/通讯作者；在 Nature、Nature/Science 子刊、PNAS、Science Bulletin 上发表论文 13 篇，其中 6 篇为第一/通讯作者；2020-2025 年见发表 SCI 论文中 10 篇为第一/通讯作者，包括：

- 《Geoscientific Model Development》2 篇（均为唯一第一作者、唯一通讯作者）
- 《Nature Climate Change》1 篇（唯一通讯作者，封面文章）
- 《Science Advances》1 篇（唯一第一作者、唯一通讯作者）
- 《Nature Food》1 篇（第一作者，共同通讯作者，封面文章）
- 《Nature Communications》1 篇（唯一第一作者、唯一通讯作者）
- 《Science Bulletin》1 篇（唯一通讯作者）

候选人围绕大气化学和气候变化相互影响方向，坚持研发高性能数值模型，系统探索大气成分在不同时间和空间尺度下的变化特征及其驱动因素。他取得的主要成绩包括：

#### 一、研发了大气科学研究中的多个高性能数值模型和计算框架

候选人自主研发了大气化学模式加速算法，显著提升了化学计算效率。该算法将大气化学模块的计算耗时降低了 50%，为地球系统模式耦合复杂化学机制提供了可能性。该算法对推动国际广泛使用的常微分方程求解工具 Kinetic PreProcessor (KPP) 的计算性能提升具有重要价值。KPP 自 1996 年发布以来，已成为 WRF-Chem、CMAQ、GEOS-Chem 等十余个国际主流大气化学模型的化学模块核心求解框架。基于上述重要贡献，候选人被列入 KPP 的八位核心开发者名单。相关成果发表在 Geoscientific Model Development (2 篇)。

候选人还研发了高效率贝叶斯反演算法，改进了集合卡尔曼滤波算法，显著提升了甲烷排放反演的精度与效率。其中，贝叶斯反演算法被哈佛大学“集成式甲烷反演平台”采纳为标准代码，并已部署于亚马逊云计算平台，成为国际温室气体排放评估的重要工具。此外，候选人与国家生态环境部卫星环境应用中心合作，承担了“区域甲烷排放遥感核算方法研究及示范应用”项目，提出一套面向中国区域尺度的甲烷排放遥感核算技术框架，可实现  $0.5^{\circ} \times 0.625^{\circ}$  空间分辨率、逐月更新的甲烷排放反演，生成了 2019 - 2024 年中国区域甲烷排放的行业级、省

级及高分辨率网格化数据集，为国家级甲烷排放监测与核算提供了重要数据支撑。相关成果因其重要价值发表于《Nature Communications》和《Science Bulletin》。

## 二、发展了大气甲烷与其他圈层的耦合理论并揭示关键调控机制

近 2-3 年，候选人进一步拓展大气甲烷与其他圈层的耦合研究，通过融合卫星遥感与生物地球化学模型，系统阐明了全球硫循环对全球甲烷排放的关键影响机制，取得两项重要突破：

(1) 基于卫星遥感获取的海洋初级生产力数据及全球船舶观测的温室气体通量，结合颗粒物沉降传输框架，解析了不同粒径颗粒物在海洋各深度的物理沉降与生物化学转化过程。研究发现，与淡水环境相比，海洋高盐度和高硫酸盐条件使有机质产甲烷（CH<sub>4</sub>）效率降低至少 98%。上述成果因其重要科学价值发表于《Nature Food》（封面文章），并获《Nature Food News》专题报道。

(2) 针对未来湿地甲烷排放预测中常忽略全球生物地球化学反馈的问题，综合评估了气象变化、大气硫酸盐沉降及 CO<sub>2</sub> 施肥效应等过程对甲烷排放的影响，估算了 2000-2100 年湿地甲烷排放。结果表明，在低 CO<sub>2</sub> 情景下，至 2100 年大气硫酸盐沉降对湿地甲烷排放的抑制效应基本消失，导致湿地排放额外增加  $7 \pm 2 \text{ Tg a}^{-1}$ ，约占湿地排放变化总量的 30%。该机制在当前地球系统模式中尚未被充分考虑。具体机制为，在淡水与海洋环境中，硫酸盐还原菌对硫酸盐的底物亲和力显著高于产甲烷菌，优先利用硫酸盐氧化有机质和氢气，从而强烈抑制产甲烷代谢路径。该工作发表在《Science Advances》上，被多家媒体报道；英国 Vincent Gauci 教授特邀候选人共同在《The Conversation》撰写科普文章，深入解读全球硫循环对甲烷排放的重要影响，进一步提升了该研究的科学传播力与社会影响力。

候选人曾荣获 2022 年谢义炳青年气象科技奖、2025 年北京大学原野新秀奖教金、北京大学青年教师基本功大赛二等奖、最佳教案奖等。他长期坚守教学科研一线，坚持以立德树人为根本任务，在教学改革与人才培养方面取得了突出成绩。

基于其扎实的学术贡献、显著的教学成果和持续的科研影响力，我谨此郑重推荐沈路路博士申报“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”。

## 2025 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：沈路路 专业技术职务：研究员 专业：大气科学

出生年月：1987 年 7 月 29 日

工作单位：北京大学物理学院大气与海洋科学系

电子邮箱：lshen@pku.edu.cn

我郑重推荐 沈路路 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：  
2026 年 1 月 10 日

推荐人姓名：车慧正 专业技术职务：研究员 专业：大气物理与大气环境

工作单位：中国气象科学研究院

电子邮箱：chehz@cma.gov.cn

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。

尊敬的“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”委员会：

我郑重推荐沈路路博士申请“清华大学—浪潮集团计算地球科学青年人才奖”。

候选人 2010 年本科毕业于北京大学，2012 年硕士毕业于清华大学，2017 年博士毕业于哈佛大学。长期从事大气成分与气候变化相互作用研究，聚焦高效率数值模型研发，系统揭示大气成分在多时间和空间尺度上的变化特征及其驱动机制。主持了海外优青项目 1 项、国家自然科学基金面上项目 1 项、科技部重点研发计划课题 1 项（课题负责人）及生态环境部卫星环境应用中心成果转化项目 1 项。迄今发表 SCI 论文 64 篇，其中第一/通讯作者 21 篇，在国际高影响期刊 PNAS、Nature Climate Change、Science Advances、Nature Food、Nature Communications、Science Bulletin 发表第一/通讯作者论文 6 篇（含 2 篇封面文章），在 Geoscientific Model Development 发表模式开发论文 2 篇。曾获 2021 年谢义炳青年气象科技奖（全国 5 人），组织了 10 余个国内外学术会议分会，担任 3 个国际期刊编委，参与编著《中国碳中和与清洁空气协同路径（2024、2025）》。候选人在地球系统模式开发上取得的主要成果包括：

#### 1. 开发了减少50%计算时间的大气化学模块加速算法

候选人开发了能减少 50%计算时间、误差低于 1%而且不会累积的大气化学模块加速算法，为地球系统模式兼容更加复杂的化学机制提供了可能性。该算法的主要原理是根据大气化学环境自动调节所需化学机制的复杂度。具体而言，基于化学反应物之间的网络关系，定义了不同化学物种之间“化学距离”，再综合考虑化学反应速率，通过机器学习算法划分了 13 个“化学家族”（图 1）。在此基础上，开发了最具代表性的 20 套不同复杂度的化学机制，再根据不同格点在不同时间的大气化学环境，让模型动态地选择合适复杂度的化学机制，从而大幅度减少计算成本。该算法被成功地应用到 GEOS-Chem 的不同版本的模拟中，结果均显示能降低化学模块 50%的模拟时间，误差不超过 1%，并且不随时间累积（Shen et al., 2020, 2022, GMD）。

同行评价：欧洲科学院院士、前马普所总负责人 Guy Brasseur 等知名专家在 *Bulletin of the American Meteorological Society* (<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0331.1>) 发表了一篇展望大气化学模式的未来发展的文章，特别指出未来的模式需要有能够自主调整化学机制的复杂度以适应不同科学问题的研究需求，而候选人开发的算法是自适应算法的典型代表，是目前大气化学模式所亟需的，非常有潜力并值得应用推广（附件 1-2）。

国际认可：该算法对提升常微分方程求解工具 Kinetic PreProcessor (KPP) 的计算效率起到了重要推动作用。KPP 自 1996 年发布以来，已成为 WRF-Chem、CMAQ、GEOS-Chem 等十余个国际主流大气化学模型的核心化学计算框架。基于候选人在算法开发与效率优化方面的

贡献，其已被列入 KPP 的八位核心开发者名单（附件 3），体现了国际同行对其工作的高度认可。

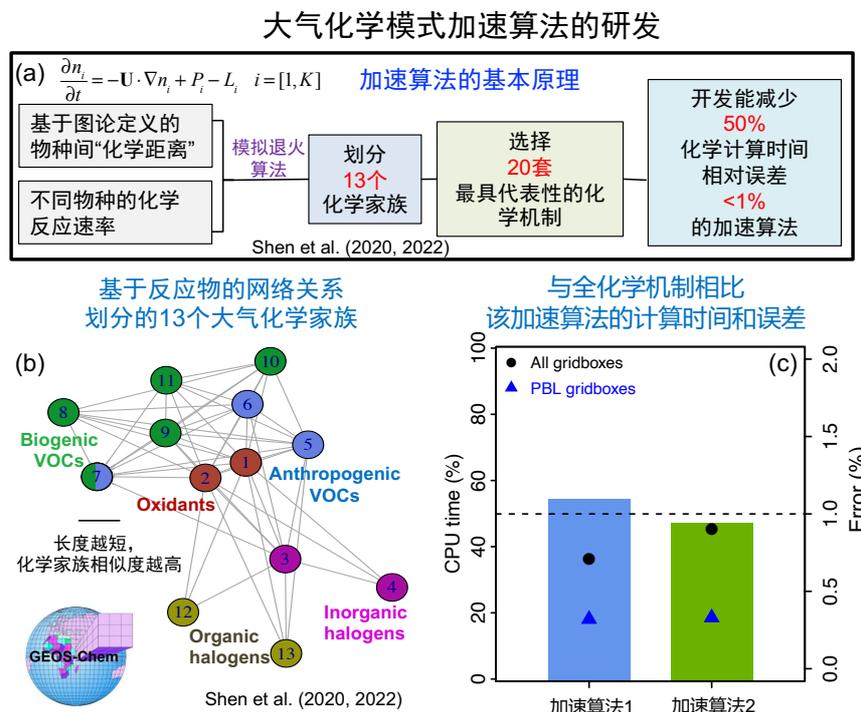


图 1. 候选人开发的大气化学模式加速算法。(a)该算法的基本技术路线；(b)基于反应物的网络关系划分的 13 个大气化学家族；(c) 该加速算法的时间效率和误差大小，具体算法请见 Shen et al. (2020, 2022, *GMD*)。

## 2. 研发了用于温室气体排放评估的高效率贝叶斯反演算法

候选人开发了能减少 80% 计算成本的用于甲烷温室气体评估的高效率贝叶斯反演算法。主要开发工作包括：(1) 基于不同排放源的空间分布和重要性，开发了混合空间分辨率的反演体系。针对重点排放源区域，采用最高分空间分辨率 25km；对其他相对不重要的格点和背景区域，通过高斯混合模型进行聚类，平均分分辨率在 100-200km。这样的混合分辨率设置可以大幅度减少贝叶斯算法中敏感性矩阵的大小，从而显著减少计算时间。(2) 修改了大气化学模式边界框架，使得我们可以自由选择模拟区域的位置和大小，从而进一步减少了模拟时间 (Shen et al., 2021, *RSE*)。基于该算法，候选人首次实现了全球 50 km 网格化甲烷排放的高精度反演，并精准量化了中国甲烷排放基线。相关成果因其重要价值发表于《Nature Communications》和《Science Bulletin》，为国家生态环境部发布的 2023《甲烷排放控制行动方案》提供数据支持。

同行评价：美国科学院院士 Steven Wofsy 教授 (10.5194/essd-16-3973-2024)，普林斯顿大学教授 Denise L. Mauzerall (10.1039/D2EE03072A)，美国科学院院士 Drew Shindell 教授 (10.3389/fsci.2024.1349770) 多次引用候选人的研究结果并肯定了算法的有效性。能源行业排

放量化被《雅虎新闻》《Bloomberg》等十多家主流媒体专题报道，媒体关注度在同时期发表的所有期刊中排名前 2%。被 Nature、National Science Review 文章多次引用，全球甲烷比对计划 Global Methane Budget 也采用了部分研究的数据 (附件 4-6)。

落地应用：(1) 候选人 2021 年发表的高效率贝叶斯反演算法入选哈佛大学的“集成式甲烷反演平台”，成为标准代码，已经发布在亚马逊云计算平台(<https://imi.seas.harvard.edu/>)，是温室气体排放评估的重要工具 (附件 7)。(2) 候选人开发的甲烷排放卫星遥感量化算法得到国家生态环境部的认可，并通过项目的形式将该模型落地，形成业务化监测甲烷排放的算法。具体而言，国家生态环境部卫星环境应用中心与候选人签订了“区域甲烷排放遥感核算方法研究及示范应用”项目 (45 万元)，候选人提出一套面向区域尺度的甲烷排放遥感核算方法，可实现区域尺度空间分辨率 (0.5°×0.625°)、逐月时间分辨率的甲烷排放反演。在中国地区重点行业开展了示范应用，可实现中国区域 2019-2024 年煤炭、油气、垃圾填埋、畜牧业等重点行业甲烷排放估算，甲烷排放遥感核算数据包括国家级、省级以及网格化数据。(附件 8)

### 高效率贝叶斯排放反演算法的研发

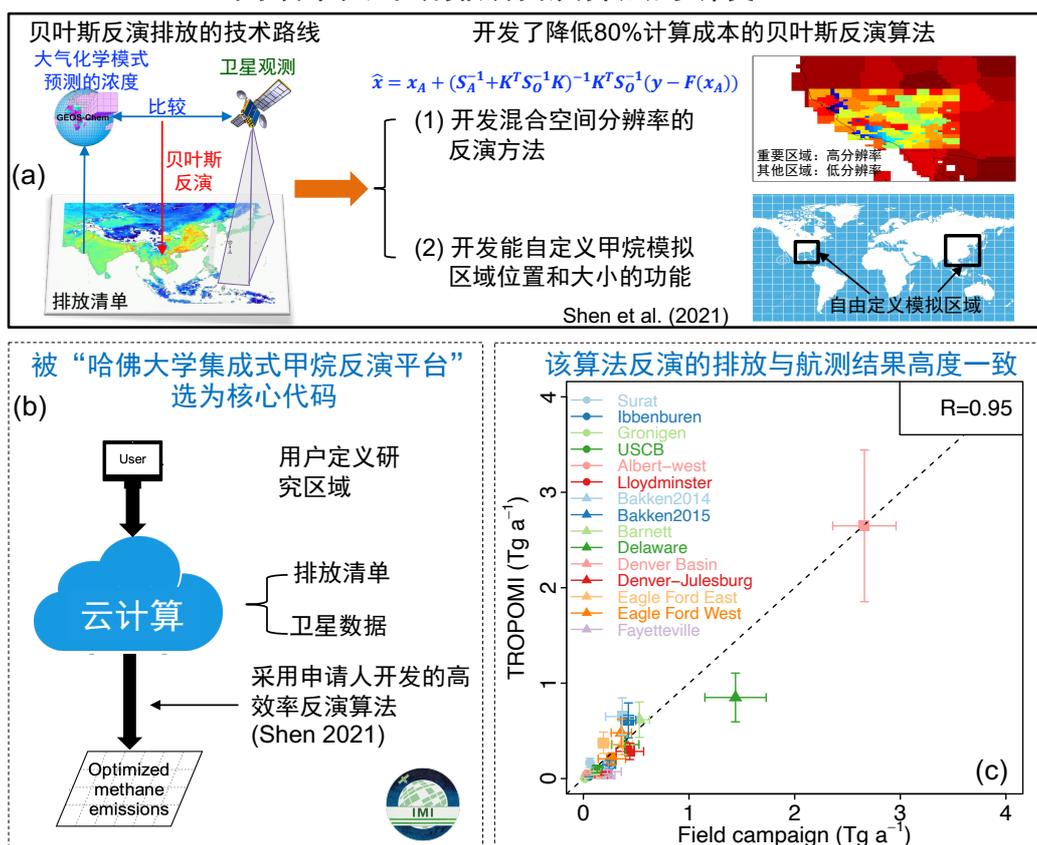


图 2. 候选人开发的高效率贝叶斯排放反演算法。(a) 该算法的主要技术路线; (b) 该算法被“哈佛大学集成式甲烷反演平台”选为核心代码，并发布在亚马逊云计算平台上，是温室气体排放苹果的重要工具。(c) 该算法反演的排放与航测结果高度一致。

## 代表性成果 (\*通讯作者)

### 大气化学模式加速算法开发

1. **Shen, L.\***, Jacob, D. J., Santillana, M., et al. A machine-learning-guided adaptive algorithm to reduce the computational cost of integrating kinetics in global atmospheric chemistry models: application to GEOS-Chem versions 12.0.0 and 12.9.1, *Geosci. Model Dev.*, 15, 1677–1687, 2022.  
主要贡献: 独立一作/独立通讯; 该研究在 Shen et al. (2020)的基础上进一步改善了加速算法, 提高了方法的可移植性, 可以降低 50%的大气化学模式的化学计算时间。(附件 1)
2. **Shen, L.\***, D.J. Jacob, M. Santillana, X. Wang, and W. Chen: An adaptive method for speeding up the numerical integration of chemical mechanisms in atmospheric chemistry models, *Geosci. Model Dev.*, 13, 2475–2486, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2475-2020>, 2020  
主要贡献: 独立一作/独立通讯; 该研究开发的自适应算法在误差不超过 1%的前提下可以降低 30-40%大气化学模式的化学计算时间。(附件 2)

### 高效率贝叶斯反演算法开发与甲烷排放相关研究

3. **Shen L.\***, Zavala-Araiza D., Gautam R.\*, et al. Unravelling a large methane emission discrepancy in Mexico using satellite observations. *Remote Sens. Environ.*, 260, 112461, 2021.  
主要贡献: 独立一作/共同通讯; 针对墨西哥地区开发了高效率的 TROPOMI 贝叶斯反演算法, 该算法后来被哈佛大学的集成式甲烷反演平台使用。(附件 4)
4. **Shen L.\***, Gautam R., Omara M., et al. Satellite quantification of oil and natural gas methane emissions in the US and Canada including contributions from individual basins, *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 11203–11215, 2022. (附件 5)  
主要贡献: 独立一作/独立通讯; 基于卫星遥感量化了北美地区能源行业的 25km 分辨率排放。
5. **Shen L.\***, Jacob D.J., Gautam R., et al. National quantifications of methane emissions from fuel exploitation using high resolution inversions of satellite observations, *Nature Communications*, 14, 4948. (附件 6)  
主要贡献: 独立一作/独立通讯; 基于卫星遥感量化了全球能源行业的高分辨率甲烷排放, 该工作被《雅虎新闻》等多家媒体报道, 媒体关注度在所有期刊文章中排前 2%。
6. Zhong H., **Shen L.\***, Qu M., Ou Y., Zhang Y., Mao H. Quantifying methane emission baselines with high-resolution satellite data to support China's emission control. *Science Bulletin*, 70(14), 2255-2259, 2025.  
主要贡献: 独立通讯, 一作为候选人的博士研究生; 该研究量化了中国不同行业甲烷排放, 探究了不同源排放量化的主要误差来源, 以及中国如何通过布置观测来提高排放量化准确性。
7. **Shen, L.\***, Peng, S., et al. The large role of declining atmospheric sulfate deposition and rising CO2 concentrations in stimulating future wetland CH4 emissions. *Science Advances*, 11, eadn1056 (2025). (附件 9)  
主要贡献: 独立一作/独立通讯; 该研究比对了不同湿地甲烷参数化方案, 揭示了大气硫酸盐沉降的减少会增加未来湿地甲烷排放的重要机制, 目前的气候评估中都忽视了该机制; 并被《The Conversation》专题报道。
8. **Shen L.\*#**, Wu L.#, Wei W.#, Yang Y., MacLeod M.J., Lin J., Song G., Yuan J., Yang P., Wu L., Li M., Zhuang M.\* Marine aquaculture can deliver 40% lower carbon footprints than freshwater aquaculture based on feed, energy and biogeochemical cycles. *Nature Food*, 5, 615–624 (2024). (附件 10)  
主要贡献: 共同一作(排第一)/共同通讯; 基于模型和观测首次揭示了海洋高盐度环境下甲烷的生成效率可以降低 98%; 该研究被选为期刊封面文章, 并被《Nature Food | News》报道。

## 2025 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：汪 祥 专业技术职务：副研究员 专业：计算机科学与技术

出生年月：1989 年 11 月

工作单位：中国人民解放军国防科技大学

电子邮箱：xiangwangcn@163.com

我郑重推荐 汪 祥 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：宋君强

推荐人单位公章：

2026 年 1 月 7 日

推荐人姓名：宋君强 专业技术职务：研究员 专业：数值预报

工作单位：中国人民解放军国防科技大学

电子邮箱：junqiang@nudt.edu.cn

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 type="checkbox"/> 国家重大科技项目首席科学家 | <input 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。

被推荐人汪祥，是国家重点研发计划青年科学家项目首席、湖南省优青、国防科技大学高层次科技创新“拔尖人才”、“军用数值预报宋君强院士创新团队”核心骨干，担任军队数值预报研发中心某室副主任、军队某自主数值预报系统主任设计师、科技部第六次国家技术预测专家；主持国家重点研发计划青年科学家项目、国家某涉海专项课题、国家自然科学基金面上与青年项目等科研人才项目 10 余项<sup>[附件 1.1]</sup>。在人工智能和海洋领域重要期刊会议上发表论文 40 余篇，总引用数达 1300 余次<sup>[附件 1.2]</sup>，获得了美国工程院院士 Bertsimas 教授、国家最高科学技术奖得主曾庆存院士等知名专家肯定，获自然资源部自然资源科学技术奖一等奖（排名第 6）、湖南省科技进步一等奖（排名第 11）、国防科技大学青年创新奖一等奖（排名第 1）各 1 项<sup>[附件 1.3]</sup>。

海洋环境预报是我国走向深蓝的重要基础技术，也被誉为海洋环境领域的“芯片”。被推荐人围绕“海洋环境智能预报”方向，**针对传统数值预报业务系统准确度提升慢、计算时间长和所需计算资源大等瓶颈问题**，牵头研制了首个自主可控全球 1/12 度海洋环境智能预报大模型“羲和”，该模型已在海军某部和空军某部业务化运行，将我军海洋水体环境的预报保障时效从 7 天提高到 30 余天，被陈大可院士等人评价总体技术达到世界领先水平；率先提出了数据驱动的台风强度与生成智能预报新方法，成果长期为中国气象局等单位提供台风灾害预警预报服务；提出了数值预报产品智能联合偏差订正与解释应用新方案，智能赋能了多个数值天气预报系统。

**1、牵头研制了首个自主可控全球 1/12 度海洋环境智能预报大模型“羲和”，总体技术达到世界领先水平<sup>[附件 2.4.1]</sup>，计算速度较传统数值预报业务系统提高 1000 倍以上。**创新发展了局部与全局时空多尺度耦合关系学习框架，设计了海洋陆地掩码多尺度自注意力机制。国际权威海洋预报评测组织 IV-TT 两年预报结果的评测显示，“羲和”在海水温度、盐度、海平面高度异常、海流等核心要素上的预报准确度达到甚至超过法国 PSY4、加拿大 GIOPS、澳大利亚 Ocean MPAS、英国 FOAM 等世界领先的海洋环境业务预报系统水平。成果在《Science》子刊第三轮审稿中，被多篇 Nature 和 Science 子刊论文引用，马克斯-普朗克气象研究所 Peter Bauer 博士（Google scholar 被引 37471 次, H 指数 57）和法国海洋环境业务预报系统负责人 Yann Drillet 指出“羲和”是**第一批基于机器学习的海洋模型**；荷兰 Henk A. Dijkstra 教授（Google scholar 被引 14183 次, H 指数 61）在《Nature Reviews Physics》中评价：“羲和”大模型是**高效生成水下海洋环境数据的模拟器**；中国气科院副院长车慧正研究员认为“羲和”大模型开启了探索使用先进神经网络方法补充数值预报的新方向<sup>[附件 2.1]</sup>。模型已在**海军某部和空军某部业务化运行**，每日向全军分发预报产品，将我军海洋水体环境的预报时效从 7 天提高到 30 余天，为海军 XX 演练、编队搜救等任务提供保障<sup>[附件 2.2]</sup>。成果获国防科技大学青年创新一等奖（排名第 1）<sup>[附件 1.3.3]</sup>；法国麦卡托国际海洋中心在计算机顶级会议 NIPS 论文的评测结果显示，“羲和”的预报技巧总体优于“问海”和“GLONET”

等其他全球海洋环境智能预报大模型<sup>[附件 2.3]</sup>；陈大可院士等人评价“羲和”总体技术达到国际领先水平，产生了显著的军事与社会效益<sup>[附件 2.4]</sup>。基于此，作为项目负责人成功获批国家重点研发计划青年科学家项目<sup>[附件 2.5]</sup>。

2、率先提出了数据驱动的台风强度与生成智能预报新方法，为中国气象局等单位提供台风灾害预报服务，显著提高预报计算速度并降低计算代价。构建了数据驱动的台风强度时空混合智能预报模型，较国际先进数值预报业务系统 GFS 的预报误差降低 20%以上；提出不平衡条件下的数据驱动台风“风半径”与强台风形成智能预报模型，将 24 小时内的风半径和强台风预报准确度分别较国际先进的数值预报业务系统 GFS 和 IFS 提高 40%和 30%以上。美国工程院院士 Bertsimas 教授（Google scholar 被引 58176 次，H 指数 110）在论文中称其飓风预报的研究受到了本成果启发<sup>[附件 3.1]</sup>。成果长期为中国气象局等单位提供台风预警预报服务<sup>[附件 3.2]</sup>，被当作典型方法写入国家“十五五”规划本科生核心课程教材《海洋数据与人工智能》中<sup>[附件 3.3]</sup>，作为主要创新点获自然资源部自然资源科学技术奖一等奖（排名第 6）<sup>[附件 1.3.1]</sup>。

3、创新提出了多要素多层次数据非线性表示学习模型，发展了数值预报产品智能联合偏差订正与解释应用新方案，智能赋能了多个数值预报业务系统。研究成果得到了美国科罗拉多州立大学 Michael Kirby 教授(Google scholar 被引 12168 次，H 指数 30)<sup>[附件 4.1.1]</sup>、国家最高科学技术奖曾庆存院士等人<sup>[附件 4.1.2]</sup>的肯定。成果应用于“云架构下海洋数值预报云服务系统”，为科学号海洋科学考察、极地科学考察和军队业务化日常保障等提供重要技术支撑<sup>[附件 4.2]</sup>。成果应用于“临近空间大气环境数值预报系统”，有效提高系统解释应用产品准确度，著名气象学家李泽椿院士评价该系统“在数值预报产品解释应用与诊断方面取得了重大技术突破和创新，...，整体技术达到当前国际水平”<sup>[附件 4.1.2]</sup>，成果作为创新点获湖南省科技进步一等奖（排名第 11）<sup>[附件 1.3.2]</sup>。

## 2025 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： 张焱 专业技术职务： 工程师 专业： 大气科学  
出生年月： 1995 年 12 月  
工作单位： 江苏省气象信息中心  
电子邮箱： zhanghana754331@cma.cn

我郑重推荐 张焱 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： 宋连春 专业技术职务： 研究员 专业： 气候  
工作单位： 国家气候中心，气候系统预测与变化应对全国重点实验室  
电子邮箱： songlc@cma.gov.cn

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

区域气候模式是开展高分辨率气候变化研究与气候预测的基础平台。在多圈层耦合和高性能计算技术支持下，区域模式能够在东亚及中国关键区域刻画陆海气相互作用、季风演变和雨带摆动，驱动区域地球系统综合模拟，提升对持续性暴雨、高温热浪、干旱等极端事件及其影响的评估和预测能力，为防灾减灾和气候风险管理提供可解释、可业务化的科技支撑。

张焱博士致力于区域气候模式的研发与应用，是区域气候模式 CWRf 研发团队和陆面过程模式 CoLM 研发团队的核心骨干，也是团队区域模式耦合技术研发和短期气候预测工作的负责人。自 2018 年以来，他围绕 CWRf 在我国气候预测中的应用开展系统研究，负责 CWRf-CoLM 陆气耦合模式的自主研发，实现了陆面多圈层过程与区域高分辨率大气的灵活耦合，明显缩小了国内区域陆气耦合模式与国际先进模式之间的差距。其代表性成果包括：1) 作为技术核心，负责 BCC-CWRf 高分辨率中国短期气候预测系统的核心流程设计与构建，实现了中国区高分辨率集合气候预测；2) 独立完成 CWRf 模式和 BCC-CWRf 业务系统在国产超级计算平台的移植与验证，并协同开展深度优化确保模式与自主可控计算环境长期保持良好适配；3) 自主独立完成陆气耦合模式 CWRf-CoLM 研发，推动我国区域模式关键技术接近国际领先团队水平。张焱所主导的 BCC-CWRf 月季预测系统在国内同类业务系统中处于领先水平，有力支撑了我国防灾减灾工作。近年来他的主要工作具体包括以下三方面：

### (1) 负责 BCC-CWRf 高分辨率中国短期气候预测系统的构建，服务气象业务

自 2018 年国家气候中心引进区域气候模式 CWRf 起，张焱博士作为技术核心骨干，先后主导建立了 BCC-CSM-HR 驱动 CWRf 中国区 30 公里月季气候预测流程和 BCC-CPSv3 驱动 CWRf 中国区 15 公里高分辨率次季节-季节预测流程，形成两套互为补充的业务系统。在此基础上，他系统开展了长期回报技巧评估与改进归因分析（张焱等，2023），针对陆面初始化提出改进方案并定量揭示其对预测技巧提升的贡献（Zhang et al., 2024），并提出多模式海温集合预测方法（专利号：8197474），以降低外强迫不确定性。相关工作有力支持了国家气候中心 BCC-CWRf 的预报业务，过去 6 年提交汛期预报会商的 PS 评分均分达到 73 分、最高达到 82 分，在国内同类业务系统中保持领先，体现了系统稳定可靠的业务可用水平，有效地支撑了汛期防灾减灾工作。

### (2) 实现 CWRf 模式在多个国产超级计算平台的移植与性能优化，适配自主算力

CWRf 模式在中国区的业务化应用，离不开对国产自主可控算力的高效适配。由于国产处理器在指令集架构和计算核心设计等方面与传统 X86 架构存在显著差异，模式移植与算力利用面临较大挑战。针对这一问题，张焱博士先后独立完成了 CWRf 在

神威“太湖之光”、“海洋之光”和中科院大气所大科学装置“寰”等国产超级计算平台上的移植和功能验证，并开展了面向国产平台的初步性能优化工作。在此基础上，他发挥数值模式与高性能计算之间的“桥梁”作用，与技术团队密切合作，完成异构算力优化等深度改进，成功将 BCC-CWRF 气候预测系统整体移植并稳定运行于国产算力平台。依托国家重点研发计划“千万核可拓展公里级海陆气耦合区域气候模式及预测系统”项目，张焱博士还对 CWRF-CoLM 模式的 IO 框架、耦合逻辑和并行架构进行深度改进，为多个子课题提供关键技术支持，作为核心骨干推动了中国区 1 公里超高分辨率气候预测系统在国产算力平台上的成功试运行，为后续模式分辨率提升和业务扩展打下了坚实基础。

### **(3) 独立完成 CWRF-CoLM 陆气耦合模式构建，改进中国区域气候模拟和预测技巧**

当前数值模式研发正从传统气候系统模拟向地球系统模拟加速演进，具有更高空间分辨率的区域模式在刻画多尺度、跨圈层相互作用方面具有独特优势。张焱博士主导社区区域地球系统模式 (Community Regional Earth System Model, CRESM) 的研发，独立完成了 CWRF 与通用陆面过程模式最新版本 (2024 版) 的双向耦合，构建形成 CWRF-CoLM 陆气耦合模式。与传统区域气候模式相比，CWRF-CoLM 主要有两方面创新：一是实现大气-陆面异构网格和跨分辨率网格的双向耦合，突破了传统紧密耦合架构中陆气必须使用同一网格的限制，在完整保留 CoLM 对陆面次网格过程和植被结构精细刻画的基础上，显著提升了陆面过程及陆气相互作用的模拟能力；二是内置跨语言通讯框架，为数值模式物理过程参数化引入机器学习算法提供了统一接口，在积雪覆盖率估计等关键物理过程上实现了深度学习替代与改进，降低了参数化不确定性，进一步提高了区域气候模拟和预测技巧。**CWRF-CoLM 的构建，为我国开展基于影响的预测和基于风险的预警业务提供了强有力支撑。**

张焱博士目前在 JC、ERL、AAS、AR 等国内外期刊发表区域气候模式及地球系统模拟方向论文 10 篇，其中第一作者 4 篇，获授权发明专利 2 项，是 CWRF 和 CoLM 研发团队的核心骨干，也是“气候系统预测与变化应对”全国重点实验室的重要骨干成员，负责中国气候综合评估模式 CIAM 中作物、水资源、生态和新能源模型与区域地球系统模式的耦合工作，在气候科学、数值模式与高性能计算交叉领域发挥了关键作用。总体来看，他既具备扎实的区域气候模式理论与研发能力，又在复杂模式系统工程实现和国产超算适配方面积累了丰富经验，能够在科学问题、工程实现和业务需求之间实现高效贯通。随着我国对极端气候事件精细化预测、气候风险管理和绿色低碳转型支撑的需求不断增强，张焱博士在高分辨率区域气候预测、国产算力适配和区域地球系统模式耦合方面的持续工作，将为国家气候服务能力提升和防灾减灾决策提供更加坚实、可解释、可持续演进的技术支撑。

## （一）代表性论文

1. **Zhang, H.**, X.-Z. Liang, Y. Dai, L. Song, Q. Li, F. Wang, and S. Zhang, 2024b: CWRf Downscaling with Improved Land Surface Initialization Enhances Spring–Summer Seasonal Climate Prediction Skill in China. *Journal of Climate*, 37, 4437–4459, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0565.1>. (第一作者)
2. **Zhang, H.**, S. Zhang, H. Xu, G. Zhang, Y. Dai, and X.-Z. Liang, 2024c: Improved simulation of compound drought and heat extremes in Eastern China through CWRf downscaling. *Environ. Res. Lett.*, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad8c6a>. (第一作者)
3. **Zhang, H.**, L. Li, and Y. Dai, 2024a: A Machine Learning Based Snow Cover Parameterization for Common Land Model (CoLM), <https://doi.org/10.5194/-egusphere-egu24-6965>. (会议, 第一作者)
4. **张焱**, 梁信忠, 汪方, 谢冰, 李清泉, 2023: CWRf 降尺度提高 BCC\_CSM1.1m 对中国夏季降水跨季度动力预测能力. *大气科学学报*, 46, 161–179, <https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210116001>. (第一作者)
5. **张焱**, 戴永久, 张树磊, 2024: 区域地球系统模式研究进展. *大气科学学报*, 47, 216–223, <https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20240124012>. (第一作者)
6. 董李丽, **张焱**, 李清泉, 汪方, 赵崇博, 谢冰, 2024: 不同分辨率 CWRf 模式对中国区域气温模拟的比较研究. *气候变化研究进展*, 20(2), 129-145, <https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2023.067>. (第二作者)

## （二）发明专利

1. 谢冰; 董李丽; 李清泉; **张焱**; 孙小婷; 赵崇博; 李禹诺; 一种多模式集合海温三步法次季节气候预测方法及系统; ZL 2025 1 0873739.1; 原始取得, 全部权利, 2025-06-27
2. 马彬; 黄亮; 郭聪; 焦圣明; 李玉涛; 鲍婷婷; 杜刚; **张焱**; 倪童; 牛霁琛; 潘赞; 王清楼; 魏晓奕; 钱奇; 基于区块链的气象数据多模型融合价值评估系统及方法; ZL 2025 1 0518311.5; 原始取得, 全部权利, 2025-04-24

## （三）附件清单

- a. 代表性论文全文
- b. 发明专利证明材料