

2020 年度“清华——浪潮地球系统科学青年人才奖”推荐书

被推荐人姓名: 陈思宇 专业技术职务: 教授 专业: 沙尘物理过程的数值模拟研究

出生年月: 1983 年 09 月

工作单位: 兰州大学大气科学学院

电子信箱: 电话:

我郑重推荐 陈思宇 作为“清华——浪潮地球系统科学青年人才奖”的候选人。

推荐人签名:  黄建平
推荐人单位公章: 大气科学学院
2020 年 11 月 15 日

推荐人姓名: 黄建平 专业技术职务: 教授 专业: 气候学

工作单位: 兰州大学大气科学学院

电子信箱: 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 ☒ 长江学者 ☐ 重点科研院所院（所）长
☒ 杰出青年基金获得者 ☐ 千人计划学者 ☒ 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以附件方式提供。

沙尘暴是一种危害社会经济和生态环境的全球性极端天气事件。能否准确预报沙尘天气对防灾减灾至关重要。沙尘天气的形成极为复杂，沙尘物理过程的准确描述是沙尘模拟和预报中最核心的科学问题，也是极端天气气候研究中亟待解决的前沿领域。

申请人长期致力于沙尘气溶胶物理过程的数值模拟研究，着力提高沙尘预报能力。围绕沙尘起沙参数化、输送机制及辐射强迫等方面开展了深入系统的研究工作。在 ES&T, ACP, JC 和 GMD 等大气科学领域权威期刊发表论文 34 篇，第一/通讯作者论文 23 篇，相关成果入选 ES&T 和 JMR 封面论文，以及 ESI 1%高被引论文、Science China“热点论文”和“中国沙漠科学十佳论文”；荣获 2019 教育部青年长江学者；2019 年度教育部自然科学奖二等奖（排名第四）；2013 年度教育部“学术新人奖”，2018 年中组部“西部之光”人才培养计划等多项荣誉；主持国家自然科学基金委重大研究计划培育项目、面上项目等 3 项国家自然科学基金和 4 项省部级项目，作为骨干成员参与了国家自然科学基金委创新研究群体、国家重点研发计划和教育部“111”引智基地等多个重大项目。

主要研究成果包括：（1）开发了目前国际上起沙种类最为完备的沙尘模块：完善的起沙参数化方案是准确描述沙尘物理过程的核心和难点，但目前的沙尘模块仅考虑了沙漠地表的风蚀起沙，忽视或严重低估了人为扰动所造成的沙尘释放，导致起沙通量的模拟误差达 10 倍以上。申请人历时三年，针对农田、稀疏草地和城市等下垫面开展了一系列起沙及人为沙源土壤理化性质的野外观测试验，获取人为起沙的关键参数，建立了高时空分辨率的地表风蚀度动态数据集；提出了区域尺度人为扰动起尘的新方法，发展了多种人为沙源的起沙方案和扬尘排放清单，使我国内陆人口密集区沙尘的模拟精度提高 10%~12%；搭建了《我国西北沙尘天气预报与预警系统》，目前正投入到甘肃、新疆等地气象和环保部门的业务工作中，24 小时沙尘预报 TS 评分平均提高了 5%~9%，服务于国家防灾减灾和大气污染防治需求 [影响评价 1]。申请人发展的沙尘模块获得了国际同行美国工程院院士、E3SM 模式开发首席科学家 L. Ruby Leung 等人的认可 [影响评价 2]；《Earth-Science Reviews》在介绍地球系统模式最新进展的综述性论文中重点介绍申请人的起沙方案 [影响评价 3]。目前该沙尘模块已被耦合到清华大学 CIESM 地球系统模式之中；相关研究成果入选 ES&T 和 JMR 的封面论文 [影响评价 4-5]。

（2）解决了关于我国东部沙尘沉降区沙尘传输来源的争议：塔克拉玛干沙漠和戈壁沙漠这两大沙源对我国东部沉降区沙尘浓度的贡献一直存在争论。申请人基于同时

考虑自然和人为扰动起沙的沙尘模块，重新量化了东亚沙尘源区和沉降区的质量收支。阐明位于中蒙交界戈壁沙尘的传输是造成我国东部地区沙尘型空气污染的主要原因，并从环流角度揭示其传输机制。相关成果入选 ESI 高被引论文、Altmetric 前 5% 论文和 Science China “热点论文” [影响评价 6-7]。威斯康星大学麦迪逊分校的 Michael Notaro 教授在文章中 5 次大篇幅引用和讨论该项研究成果，全文围绕申请人的观点，从观测角度证实了戈壁沙尘在东亚及北半球的输送潜力 [影响评价 8]。国际知名风沙学家 Jasper Kok 教授在 Nature Geoscience 上发表文章认为申请人关于沙尘粒子尺度分布不确定性的研究对沙尘远距离输送的准确描述十分重要 [影响评价 9]。

(3) 构建了东亚沙尘传输对青藏高原热源影响的完整物理图像：东亚沙尘对青藏高原热源影响的研究是备受关注的热点和难点问题。然而，目前对高原上空沙尘的来源、传输路径尚不清晰，导致东亚沙尘与高原热源的反馈机制存在很大的不确定性。申请人发现并证实了夏季高原经圈环流驱动下塔克拉玛干沙尘到青藏高原北部的经向传输路径；揭示了高原沙尘辐射强迫对地表能量平衡的影响机制，厘清了沙尘传输对高原热源的放大效应。相关成果为研究高原热源对下游极端天气气候的影响提供了科学支撑。美国科学院院士、美国地球化学学会终生成就奖获得者--加州大学圣地亚哥分校 Thiemens 教授基于观测证实了申请人关于塔克拉玛干沙尘经向传输路径的结果 [影响评价 10]。美国能源部气候与环境科学署发表专题文章《Wind and Cold Carry Dust to New Heights》，重点推介申请人研究成果，认为塔克拉玛干沙尘经向输送路径的发现对研究青藏高原局地气候变化有重要意义 [影响评价 11]。相关内容是 2019 年度教育部自然科学二等奖的重要组成部分 [影响评价 12] 以及 2013 年教育部学术新人奖 [影响评价 13]。

2020 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: 刘超 专业技术职务: 教授 专业: 大气科学

出生年月: 1987 年 12 月

工作单位: 南京信息工程大学

电子邮箱: 电话:

我郑重推荐 刘超 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: 王会军 专业技术职务: 院士 专业: 大气科学

工作单位: 南京信息工程大学

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(所)长

☒ 国家重大科技项目首席科学家 ☒ 国际重要学术组织任职学者

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。

被推荐人刘超的主要科学技术成果

刘超为南京信息工程大学教授、博士生导师，主要从事大气辐射和大气遥感方向的研究，是一名优秀的青年学者。其代表成果包括：研发了多个气溶胶和冰云光学模型，可用于地球系统模式中大气气溶胶和冰云辐射特性的表征和参数化；提出了基于光谱信息压缩、机器学习等方法的快速辐射传输算法，应用于卫星定量反演，提高辐射传输计算效率；利用新一代气象卫星光谱成像仪通道设计，突破现有被动光谱成像仪云反演算法，提出了多层云识别及光学和微物理特性定量反演算法。

近年来刘超以第一作者或通讯作者在 JAS、RSE、GRL、ACP、JGR 等期刊发表 SCI 论文三十余篇，论文引用 800 余次；先后荣获 2017 年 Elsevier 出版社和 JQSRT 杂志评选的 Waterman Award 和 2018 年美华海洋-大气学会（COAA）评选的 Yuxiang Young Scholar Award 两项国际青年学者奖，并入选中国科协“青年人才托举工程”。刘超目前担任 Science China: Earth Sciences 期刊编委、Journal of Geophysical Research-Atmospheres 和 Atmospheric Science Letters 期刊副编委，曾组织多个国际会议分会场。

被推荐人刘超的主要研究成果包括：

1. 研发了“双形状”冰云光学模型，用于提高模式中冰云光学和微物理特性的表征

云覆盖了地球 60%以上的区域，是天气和气候模拟的重要部分，也是不确定性最大的因素之一。其中，近三分之一是由形状复杂多变的冰晶粒子构成的冰云，冰晶粒子不规则的非球形结构使得数值模式中对其光学和微物理特性的表征一直是国内外研究和模式研发的难点，给云特性定量反演和云辐射效应评估带来很大的不确定性。

刘超基于机载观测、卫星反演和模式需求等因素，构建了全新的冰晶粒子非球形模型，建立对应粒子全光谱光学特性数据库，最终研发了一个基于“双形状”的冰云模型，该模型实现了对冰云光学、极化和微物理等特性的同时表征，并提高了多光谱卫星反演云特性的一致性，基于该模型的全光谱光学特性数据库可方便地用于模式冰云光学特性参数化及冰云特性的卫星反演。

相关成果发表以来（Liu 等，ACP，2014；Liu 等，JQSRT，2013），受到国内外专家广泛认可。大气科学知名学者 Andrew Heymsfield 教授在其论文中指出：“As the light scattering properties of ice clouds can be characterized using simple and complex particles [Liu et al., 2014], this finding will be useful for parameterizing the light scattering properties of clouds in climate models.”。因为该双形状模型得到的光学特性与机载观测有更高的一致性，该模型被用于 ECHAM 模式冰云光学模块的优化，并发现了目前该模式对冰云冷却效应低估了 1.12 W/m^2 （Jarvinen 等，ACP，2018）。同时，该模型也被用于快速辐射传输模型中冰云光学特性的参数化、以及卫星数据的辐射仿真和定量反演。

2. 研发快速、准确的有云/气溶胶大气的辐射传输模式

不管是卫星遥感、资料同化等定量应用中的辐射强度，还是天气、气候模式中的辐射通量和加热率，都需要对辐射量进行快速、准确数值模拟，所以辐射传输算法一直是地球科学研究和模拟的基础内容。因为涉及不同粒子表征、多次散射快速计算等问题，如何实现有云/气溶胶大气情况快速、准确的辐射传输计算，一直是大气辐射领域研究的难点和热点。

刘超也开展了辐射传输模式研发和辐射仿真研究工作。针对窄带成像仪，使用相关 k 分布算法处理气体吸收、使用基于优化分布的双向反/透射数据库处理粒子散射，研发了用于风云卫星成像仪等仪器的快速辐射传输模式（Liu 等, JGR, 2014; Yao, Liu*等, Sci. China Earth Sci., 2020）。该算法适用于有云/气溶胶大气情况辐射传输的准确求解，计算精度满足卫星定量遥感需求，计算效率较精确算法提高 2 个数量级以上，计算效率较类似快速模式快 3 倍。同时，刘超还提出了基于光谱数据压缩技术和机器学习的高光谱快速辐射传输算法（Liu 等, JAS, 2020; Le, Liu*等, JQSRT, 2020），进一步提高了当前快速算法的计算精度和计算效率。

这些算法已经服务于我国风云系列卫星的资料仿真模拟、反演算法研发、数据和模式评估等研究（Yao, Liu*等, JGR, 2018; Wang, Liu*等, IEEE TGRS, 2018），并将为后续仪器研发和参数设计提供理论支持。高效的高光谱模式不仅可以服务卫星定量应用，也将为提高天气和气候模式中辐射传输模拟的光谱分辨率提供可能，具有很强的应用潜力。

3. 研发星载成像仪云特性反演算法

凭借在粒子光学和辐射传输方面的积累，近年来刘超拓展和研发了全新的卫星遥感云特性反演算法。目前国际上基于光谱成像仪的云特性产品大多基于单层均匀云层假设，对具有复杂垂直结构的云表征能力有限。不同于传统算法，刘超提出了使用多个云吸收通道的多层云识别（Wang, Liu*等, RSE, 2018）和多层云光学厚度和云微物理特性定量反演算法（Teng, Liu*等, GRL, 2020），显著提高了星载被动遥感仪器对云垂直特征的探测能力和认识。另外，刘超团队已经将其研发的云光学和微物理特性反演算法用于风云四号 A 星成像仪 AGRI 云特性反演（Lai 等, Liu*, RS, 2018），其反演结果与 MODIS 产品的相对误差控制在 30% 以内，不仅远优于当前业务产品，同时达到日本葵花 8 号产品相同水平，有望提高国产卫星定量反演能力。

上述研究工作和成果的积累，充分展示了刘超教授在大气辐射、卫星遥感等计算地球科学基础研究方向上的突出成果和巨大潜力。因此，我郑重推荐刘超教授作为 2020 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。

附第一/通讯作者论文列表:

- C. Liu, R. L. Panetta*, and P. Yang, 2013: The effects of surface roughness on the scattering properties with sizes from the Rayleigh to the geometric-optics regimes. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 129, 169-185. 【冰云光学特性模型】
- C. Liu, P. Yang*, P. Minnis, N. Loeb, S. Kato, A. Heymsfield, and C. Schmitt, 2014: A two-habit model for the microphysical and optical properties of ice clouds. *Atmo. Chem. Phys.*, 14, 13719-13737. 【冰云模型】
- C. Liu, P. Yang*, S. L. Nasiri, S. Platnick, K. G. Meyer, C. Wang, and S. Ding, 2015: A fast Visible-Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) simulator for cloudy atmospheres. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, doi:10.1002/2014JD022443. 【快速辐射传输算法】
- B. Yao, C. Liu*, Y. Yin, P. Zhang, M. Min, and W. Han, 2018: Radiance-based evaluation of WRF cloud properties over East Asia: direct comparison with FY-2E observations. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123, 4613-4629. 【快速辐射传输算法应用】
- B. Yao, C. Liu*, S. Teng, L. Bi, Z. Zhang, P. Zhang, and B.-J. Sohn, 2020: An accurate and efficient radiative transfer model for simulating all-sky images from Fengyun satellite radiometers. *Sci. China Earth Sci.*, 63, 1701-1713. 【针对风云卫星的辐射传输模式】
- T. Le, C. Liu*, B. Yao, V. Natraj, and Y. L. Yung, 2020: Application of machine learning technique for hyperspectral radiative transfer simulations. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 246, 106928. 【高光谱快速辐射传输算法】
- C. Liu, B. Yao, V. Natraj*, P. Kopparla, F. Weng, et al., 2020: A spectral data compression (SDCOMP) radiative transfer model for high-spectral-resolution radiation simulations. *J. Atmos. Sci.*, 77, 2055-2066. 【高光谱快速辐射传输算法】
- J. Wang, C. Liu*, M. Min, X. Hu, Q. Lu, and L. Husi, 2018: Effects and applications of satellite radiometer 2.25- μm channel on cloud property retrievals. *IEEE T. Geosci. Remote Sensing*, 56, 5207-5216. 【星载成像仪云吸收通道研究】
- J. Wang, C. Liu*, B. Yao, M. Min, H. Letu, Y. Yin, and Y. L. Yung, 2019: A multilayer cloud detection algorithm for the Suomi-NPP Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS). *Remote Sens. Environ.*, 227, 1-11. 【双层云识别算法】
- R. Lai, S. Teng, B. Yi, H. Letu, M. Min, S. Tang, and C. Liu*, 2019: Comparison of clouds properties from Hamawari-8 and FengYun-4A geostationary satellite radiometers with MODIS cloud retrievals. *Remote Sens.*, 11, 1703. 【风云四号 A 星云特性反演算法】
- S. Teng, C. Liu*, Z. Zhang, Y. Wang, B.-J. Sohn, and Y. L. Yung, 2020: Retrieval of ice-over-water cloud microphysical and optical properties using passive radiometers. *Geophys. Res. Lett.*, 47, e2020GL088941. 【双层云光学和微物理特性定量算法】
- M. Zhang, S. Teng, D. Di, X. Hu, M. Min, H. Letu, and C. Liu*, 2020: Information content of ice clouds form multi-spectral, -angle and -polarization observations. *Remote Sensing*, 12, 254854. 【云特性定量遥感理论研究】
- B. Yao, S. Teng, R. Lai, X. Xu*, Y. Yin, C. Shi, and C. Liu*, 2020: Can atmospheric reanalysis (CRA and ERA5) represent cloud spatiotemporal characteristics?. *Atmos. Res.*, 244, 105091. 49. 【国产再分析资料云数据质量评估】
- Q. Lu, C. Liu*, C. Zeng, D. Zhao, J. Li, C. Lu, and B. Zhu, 2020: Atmospheric heating rate due to black carbon aerosols: uncertainties and impact factors. *Atmos. Res.*, 240, 104891. 【黑碳辐射效应】
- Y. Huang, C. Liu*, Y. Yin, and L. Bi, 2020: Scattering phase matrix of mineral dust aerosols: a refinement of refractive index impact. *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 2865-2876. 【沙尘气溶胶光学模型】
- B. Yao, C. Liu*, Y. Yin, Z. Liu, C. Shi, and F. Weng, 2020: Assessment of reanalysis data of the cloudy atmosphere with satellite observations over East Asia. *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 1033-1049. 【再分析资料云特性定量评估】
- Y. Zhu, C. Liu*, and M. A. Yurkin, 2019: Reproducing the morphology-dependent resonances of spheres with the discrete dipole approximation. *Opt. Express*, 27, 22827-22845. 【粒子散射模型算法研发】

- C. Zeng, C. Liu*, J. Li, B. Zhu, Y. Yin, and Y. Wang, 2019: Optical properties and radiative forcing of aged BC due to hygroscopic growth: Effects of aggregate structure. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124, 4620-4633. 【黑碳气溶胶光学模型研发】
- S. Teng, C. Liu*, M. Schnaiter, R. K. Chakrabarty, and F. Liu, 2019: Accounting for the effects of nonideal minor structures on the optical properties of black carbon aerosols. *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 2917-2931. 【黑碳气溶胶光学模型研发】
- C. Liu*, X. Xu, Y. Yin, M. Schnaiter, Y. L. Yung, 2019: Black carbon aggregates: an optical property database. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 222-223, 170-179. 【黑碳气溶胶光学数据库】
- C. Liu*, S. Teng, Y. Zhu, M. Yurkin, and Y. L. Yung, 2018: Performance of discretize dipole approximation for optical property simulations of black carbon aggregates. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 221, 98-109. 【粒子散射模型算法研发】
- C. Liu*, C. E. Chung, Y. Yin, and M. Schnaiter, 2018: The absorption Ångström exponent of black carbon: from numerical aspects. *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 6259-6273. 【黑碳气溶胶光学特性】
- S. Teng, H. Hu, C. Liu*, F. Hu, Z. Wang, and Y. Yin, 2018: Numerical simulation of raindrop scattering for C-band dual-polarization Doppler weather radar parameters. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 213, 133-142. 【粒子散射模型算法研发】
- C. Liu*, J. Li, Y. Yin, B. Zhu, and Q. Feng, 2017: Optical properties of black carbon aggregates with non-absorptive coating. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 187, 443-452. 【混合气溶胶光学模型】
- C. Jin, C. Liu*, Y. Yin, L. Bi, and T. Nousiainen, 2016: Modeling the scattering phase matrix of red clay. *Opt. Lett.*, 41, 4879-4882. 【沙尘气溶胶光学模型研发】
- C. Liu*, C. E. Chung, F. Zhang, and Y. Yin, 2016: The color of biomass burning aerosols in the atmosphere. *Sci Rep.*, 6: 28267. 【吸收性气溶胶光学模型】
- J. Li, C. Liu*, Y. Yin, and K. R. Kumar, 2016: Numerical investigation on the Ångström Exponent of black carbon aerosols. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, doi:10.1002/2015JD024718. 【黑碳光学特性研究】
- C. Liu*, and Y. Yin, 2016: Inherent optical properties of pollen particles: a case study for the morning glory pollen. *Opt. Express*, 24(2), A104-A113. 【生物质气溶胶光学模型研发】
- C. Liu*, Y. Yin, F. Hu, H. Jin, and C. Sorensen, 2015: The effects of monomer size distribution on the radiative properties of black carbon aggregates. *Aerosol Sci. Tech.*, 49(10), 928-940. 【黑碳气溶胶光学模型研发】
- C. Liu, R. L. Panetta, and P. Yang*, 2014: The effective equivalence of geometric irregularity and surface roughness in determining particle single-scattering properties. *Opt. Express*, 22, 23620-23627. 【粒子散射模型研发】
- C. Liu, R. L. Panetta, and P. Yang, 2014: Inhomogeneity structure and the applicability of effective medium approximations in calculating light scattering by inhomogeneous particles. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 146: 331-348. 【气溶胶光学模型研发】
- D. I. Podowitz, C. Liu*, P. Yang, and M. A. Yurkin, 2014: Comparison of the pseudo-spectral time domain method and the discrete dipole approximation for light scattering by ice spheres. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 146: 402-409. 【粒子散射模型算法研发】
- C. Liu, R. L. Panetta*, P. Yang, A. Macke, and A. J. Baran, 2013: Modeling the scattering properties of mineral aerosols using concave fractal polyhedra. *Applied Optic*, 52: 640-652. 【沙尘光学模型研发】
- C. Liu, L. Bi, R. L. Panetta, P. Yang*, and M. A. Yurkin, 2012: Comparison of the pseudo-spectral time domain method and the discrete dipole approximation for light scattering simulations. *Opt. Express*, 20: 16763-16776. 【粒子散射模型算法研发】
- C. Liu, R. L., Panetta, and P., Yang*, 2012: Application of the pseudo-spectral time domain method to compute particle single-scattering properties for size parameters up to 200. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 113: 1728-1740. 【粒子散射模型算法研发】
- C. Liu, R. L., Panetta*, and P., Yang, 2012: The influence of water coating on the optical scattering properties of fractal soot aggregates. *Aerosol Sci. Tech.*, 46: 32-43. 【黑碳气溶胶光学模型研发】

2020 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：__王焱__ 专业技术职务：__高级__ 专业：__生态学__

出生年月：__1984 年 1 月 25 日__

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：
2020 年 12 月 18 日

推荐人姓名：__宫鹏__ 专业技术职务：__高级__ 专业：__地理学__

工作单位：__清华大学地球系统科学系__

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 ☐重点科研院所院（所）长
☐国家重大科技项目首席科学家 ☒国际重要学术组织任职学者

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。

被推荐人长期从事植被定量模拟的研究，围绕植物功能适应及其对全球气候-碳反馈的影响这一跨尺度的科学问题展开研究，基于自组织原理，开发了普适性全球植被生产力新模型 **Pmodel**，将现有模型的参数从十几个降为两个，**Pmodel** 得到国内外同行的认可并被广泛使用。基于此，被推荐人以第一/通讯作者在 **Nature Plants**、**Global Change Biology** 等学科主流期刊发表论文十余篇，研究成果已在国内外产生重要的学术影响。主要科学内容、原创性、科学意义及影响力概括如下：

科学内容：

植被生产力模型是定量评估和预测全球陆地生态系统生产力及植被碳循环发展和变化的重要工具。但是由于目前对光合适应机制的认识不够全面，植被生产力模型在对植物光合作用进行模拟时，严重依赖于经验参数。这为地球系统模式进行全球植被生产力，乃至未来气候-碳反馈的预测带来了巨大的不确定性。

被推荐人从自组织原理出发，通过定量揭示了胞间 CO_2 浓度适应长期升温的新机制，以及最大羧化能力的 CO_2 补偿机制和光适应机制；将微观水平光合生理适应与宏观尺度冠层光利用的效率变化联系起来，系统阐述了 CO_2 等环境因子对冠层光利用效率的作用机制；在此基础上，提出了光合适应模拟的新方案，并将其整合到经典的光合作用生化模型中，开发了基于光合适应理论的新一代全球植被生产力普适性模型 **Pmodel**。

创新性：

已有的植被生产力模型多采用离散的静态参数，来反映光合能力在物种之间的巨大差异，忽视了光合能力对气候和 CO_2 浓度变化的适应，面临着写实性（多过程）与稳健性（少参数）难以兼顾的技术难题。

被推荐人阐述了光合性状适应环境变化的驱动机制和理论基础，用基于自组织原理的光合能力模拟新方案替代已有的参数化方案，创新性地开发了普适性新模型 **Pmodel**，摆脱了生产力模型对植物功能型参数的依赖，解决了已有模型难以模拟光合适应的难题，弥补了光能利用率模型对 CO_2 施肥效应考虑不足的缺陷。**Pmodel** 具有强大的理论，突破了写实性与稳定性难以兼顾的困境，在引入光合适应过程，提升了模拟效果的同时，将参数个数从十几个精简为两个。

科学价值：

美国科学院院士 Joseph Berry、国际通量观测网络主席 Dennis Baldocchi、**Remote Sensing of Environment** 副主编 Yougryel Ryu 在关于光合作用研究进展的综述文章中，指出 **Pmodel** 采用了自组织原理展开模拟，能够计算 CO_2 施肥效应对光能利用率的影响，而以前的光能利用率框架则忽略了该影响【见附件 1】。近期，

Trends in Ecology & Evolution 上刊发的综述文章，援引被推荐人的研究作为解决模型高复杂性和难参数化的成功案例，指出这种模拟方案应是未来植被模型发展的方向

【见附件 2】。Tansley 特邀综述文章和 insights 文章在总结植被模型中的光合模拟方案时，也特意强调了 Pmodel 的性状模拟方案，作为对经典光合作用生化模型和传统参数化方案的最新发展【见附件 3】。

Pmodel 的科学价值受到了欧洲太空局的认可，其评价该模型从基本原理出发，具有坚实的理论基础，实现了对简约性、理论性以及经验支持的最优组合。基于标准的光合作用模型，同时又考虑了适应过程。欧洲太空局在 2017 年启动的全球准实时生产力监测项目(<https://terra-p.vito.be>) 中，选择了 Pmodel 为该项目的唯一依托模型【附件 4】。

Pmodel 还被国内外同行广泛应用于全球碳循环过程的诊断工作。例如：利用 Pmodel，阐明 CO₂ 对全球植被光利用效率的施肥效应是大气 CO₂ 浓度增长停滞的主要原因（Keenan et al. 2016, Nature Communication），诊断评估土壤水分胁迫对陆地生产力的影响（Stocker et al. 2019, Nature Geoscience），实现对自由二氧化碳增浓实验结果的外推（Liu et al. 2019, Nature Geosciences），分离光合作用和气孔导度对森林水分利用率的作用（Guerrieri et al. 2019, PNAS），为高纬度地区净初级生产力增加的归因提供理论支持（Gallego-Sala et al. 2018, Nature Climate Change）等等。此外，Pmodel 还作为树木生长新模型的驱动模块，用于树木年轮的模拟及古气候的重建工作（Li et al. 2014, Biogeosciences）【见附件 5a 至 5f】。

影响力:

被推荐人的研究获得国际同行认可，推动了自组织原理框架下植物适应机制和理论的进一步推广和细化（Smith et al. 2019, Ecology Letters；Peng et al. 2019 New Phytologist）【附件 6】。

被推荐人受国际应用系统分析研究所（IIASA，第一代全球动态植被模型起源地）邀请，与法国生物多样性与生态地中海研究所所长 Wolfgang Cramer 教授等 5 名学者联合主持“新一代动态植被模型”项目，探索自组织原理在定量揭示植物功能适应机制和开发新一代植被模型方面的应用【附件 7】。在该项目的支持下，植被模拟领域 32 位世界顶尖学者开展研讨会，共同撰写综述论文 Organization Principles for Vegetation Dynamics（Franklin et al. 2019, Nature Plants），强调生命系统的自组织原理对揭示植被动态驱动机制具有重要意义【附件 8】。

其他相关科学贡献:

此外，被推荐人还借助 Pmodel 将 CO₂ 施肥效应引入植被分布变迁和作物估产模拟，为古气候重建工作和快速诊断 CO₂ 施肥效应提供了新思路。国际古气候对比项目

PMIP (www.pmip3.lsce.ipsl.fr) 联合主席 Sandy Harrison 教授等发表综述文章，总结古气候模拟研究进展时，对被推荐人的模拟方法进行介绍，称该方法作为过程模型的补充，可用于快速修订古气候重建的结果【附件 9】。被推荐人综合自主研发的植被模型对中国植被分布和固碳潜力进行评估。联合国政府间气候变化联合委员会 IPCC 第 5 次报告关于“影响、适应和脆弱性”的亚洲区域工作总结中，4 次引用被推荐人的该项研究工作【附件 10】。

2020 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: 张贺 专业技术职务: 副研究员 专业: 气象学

出生年月: 1981 年 3 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 张贺 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:

2020 年 12 月 16 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 ☐ 重点科研院所院(所)长

☐ 国家重大科技项目首席科学家 ☐ 国际重要学术组织任职学者

推荐理由：

张贺博士一直致力于地球系统模式的研发及其应用，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”总工程师助理，大气环流模式分系统负责人。他主持并持续发展了中国科学院大气物理研究所（以下简称“大气所”）大气环流模式 IAP AGCM，也作为团队核心成员主持了我国自主研发的地球系统模式 CAS-ESM 中各分量模式的耦合、调试和模拟评估。张贺博士是我国少有的几个对全球大气、海洋、陆面模式及其耦合，以及模式的高效并行算法有全面认识的模式研发人员之一。研制成功的 CAS-ESM 已参加第六次国际耦合模式比较计划，给出了不同情景下未来气候变化的预估结果，并应用于我国及一带一路区域气候灾害的实时预报，为国家防灾减灾及制定未来气候变化应对的国家战略提供决策依据，同时也可作为气候变化的国际谈判提供科学支撑。近年来他的主要研究成果包括：

1. 大气环流模式 IAP AGCM 的研发

主持完成了大气所系列大气环流模式（IAP AGCM4.0，IAP AGCM4.1 和 IAP AGCM5.0）的研发，在模式的动力框架、物理过程和并行技术方面都取得创新。动力框架方面，创新性地设计了高纬灵活性跳点格式和协调的时间分解算法，在保证模式总有效能量守恒的前提下，大幅提高了模式的计算效率（Zhang et al., 2013）。为解决原有 FFT 滤波全局通信造成的并行可扩展性低的问题，设计了两种新的局地滤波方案：高斯自适应滤波及自适应跳点格式，在保证滤波效果的同时大大提高了并行可扩展性。

物理过程方面，设计了考虑云滴谱离散度的云滴有效半径和云水自动转化过程的云微物理参数化方案。试验结果表明，新方案模拟的云短波和长波辐射强迫在全球平均值和均方根误差方面均较原方案有明显改进。同时，新方案有效减小了原方案模拟的气溶胶间接效应，与卫星资料估计的结果更为接近（Xie et al., 2018）。

基于局地滤波方案，合作设计了 IAP AGCM 基于三维剖分的并行算法，并在天河-2 超级计算机进行了效率测试。结果表明，在原二维剖分框架下，模式仅能扩展到 1024 核，计算速度为 2.3 模式年/天；在新设计的三维剖分框架下则可扩展到 3.2 万核，两种滤波方案的计算速度分别达到 13.8 模式年/天和 16.6 模式年/天，计算速度大幅提高。相关成果已在高性能计算著名会议 IPDPS 2020 上发表（Cao et al, 2020）。

水平分辨率的提高是改善模式模拟性能的重要途径，在 IAP AGCM 标准版本（ $1.4^{\circ} \times 1.4^{\circ}$ ）的基础上，张贺等人完成了 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 及 $0.23^{\circ} \times 0.31^{\circ}$ 高分辨率大气环流模

式 IAP AGCM 的研发 (Zhou et al., 2016), 显著改善了模式对降水日变化及热带气旋等的模拟能力 (李星雨等, 2018; 周颖等, 2020)。

2. 地球系统模式 CAS-ESM 的研制及 CMIP6 试验

张贺是 CAS-ESM 最为关键的核心研发人员, 负责最棘手的分量模式耦合及优化调试工作。在他攻克了计算不稳定, 气候漂移等一系列技术难题后, CAS-ESM1.0 于 2015 年 9 月发布。之后为提高模式性能, 他带领团队设计并开展了数千年的数值积分试验, 通过对模式误差来源的深入剖析, 持续对模式方案及相关参数进行改进和优化。历经近 5 年努力, 于 2020 年 1 月完成了新一代 CAS-ESM2.0 的定型, 并完成了第六次国际耦合模式比较计划 CMIP6 的相关模拟试验。

相比 CAS-ESM1.0, CAS-ESM2.0 在大气模式、海洋模式、陆面模式、植被动力学模式、耦合器等分量模式的关键算法及物理参数化方面都有了显著的改进。基于 CMIP6 的 DECK 试验和历史模拟试验, 对 CAS-ESM2 的性能进行了系统性评估。结果表明, 模式对当代气候有较好的模拟能力, 如全球辐射平衡、20 世纪全球增暖趋势、ENSO 的周期和振幅、海冰的季节变化等, 尤其能够准确地模拟大气及海洋的经向热输送以及大西洋经圈翻转环流的垂直廓线。相关成果已在地球系统模式领域的顶级期刊《Journal of Advances in Modeling Earth Systems》上在线发表 (Zhang et al., 2020)。CAS-ESM2.0 的未来情景预估表明, 在高排放 (SSP585) 和低排放 (SSP126) 情景下, 2100 年的全球平均温度分别上升 4.5°C 和 1.5°C。

CAS-ESM2.0 的研发及 CMIP6 试验也是“地球系统数值模拟装置”建设的亮点工作。基于 CAS-ESM2.0 的研发成果, CAS-ESM 研发团队在中国科学院“率先行动”第一阶段目标任务总结评估中, 获得优秀。

3. CAS-ESM 的模拟预测应用及推广

鉴于良好的模拟性能, IAP AGCM4.0 及更高版本已被广泛应用于气候变化、古气候、季风、高温热浪、季节内震荡、降水日变化、热带气旋等方面的模拟及机理研究 (Dong et al., 2012; Wang and Wang, 2013; Su et al., 2014; Yan et al., 2014; Lin et al., 2016; 林朝晖等, 2017; Adeniyi et al., 2019; Kong et al., 2020; 周颖等, 2020)。

基于 CAS-ESM 建立了新一代全球短期气候预测系统 IAP DCPv3, 该系统被应用于我国汛期气候的年度实时预测和春季沙尘趋势预测中, 并参加国家气候中心的预测会商。系统准确地预测出 2019 年我国汛期的降水异常, PS 评分为 76 分, 位列全国第一。对 2020 年夏季长江流域的多雨也进行了成功的预报。该预测系统对我国气候异常

的预测结果每年均上报国办、中办，供领导决策采用。该预测系统及其预测产品在一带一路国家得到了成功的推广应用。

基于 CAS-ESM 的耦合框架，建成了全球与区域模式 WRF 的双向耦合模式系统，并据此建立了 CAS-ESM/WRF 季节预测系统。该系统已经在重庆市气候中心，福建省气候中心等单位得到了初步应用并取得了良好的效果。基于高分辨率 CAS-ESM，建成了我国周边重点区域的季节预测系统，即将在某业务单位开始试运行。

代表性论文：

- [1] **Zhang, H.**, Zhang, M., Jin, J., Fei, K., Ji, D., Wu, C., et al. (2020). CAS-ESM 2: Description and climate simulation performance of the Chinese Academy of Sciences (CAS) Earth System Model (ESM) version 2. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2020MS002210. <https://doi.org/10.1029/2020MS002210>.
- [2] Cao, Hang, Liang Yuan, **He Zhang***, Baodong Wu, Shigang Li, Pengqi Lu, Yunquan Zhang, Yongjun Xu, and Minghua Zhang. 2020. A Highly Efficient Dynamical Core of Atmospheric General Circulation Model based on Leap-Format. In 2020 IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium, pp. 95-104.. doi: 10.1109/IPDPS47924.2020.00020.
- [3] 周颖, **张贺***, 张珂玮. 2020. 基于 K-均值聚类方法的大气环流模式 IAP AGCM4.1 对西北太平洋热带气旋的模拟评估. *大气科学*, 44 (5), 1141-1154.
- [4] 李星雨, 毕训强, **张贺**. 2018. 全球模式 NCAR CESM 和 CAS ESM 对亚洲东部夏季气候的模拟性能评估: 气候平均态和降水日变化分析. *气候与环境研究*, 23 (6): 645-656.
- [5] Xie, X., **H. Zhang**, X. D. Liu, Y. R. Peng, and Y. G. Liu, 2018: Role of microphysical parameterizations with droplet relative dispersion in IAP AGCM 4.1. *Adv. Atmos. Sci.*, 35, 248-259.
- [6] Zhou, G., **H. Zhang**, F. Zhang, et al., 2016: Studies on High-Resolution Atmospheric and Oceanic General Circulation Models. In *Development and Evaluation of High Resolution Climate System Models*, R. Yu, et al., Eds., Springer Singapore, 49-103, doi: 10.1007/978-981-10-0033-1_2.

其他参考文献

- Adeniyi, M. O., Z. Lin, and H. Zhang, 2019: Evaluation of the performance of IAP-AGCM4.1 in simulating the climate of West Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 136, 1419-1434.

- Dong, X., F. Xue, H. Zhang, and Q. Zeng, 2012: Evaluation of surface air temperature change over China and the globe during the twentieth century in IAP AGCM4.0. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 5, 435-438.
- Kong, X., Wang, A., Bi, X., Li, X., & Zhang, H., 2020: Effects of horizontal resolution on hourly precipitation in AGCM simulations. *Journal of Hydrometeorology*, 21(4), 643-670.
- LIN Zhao-hui, YU Zheng, ZHANG He and WU Cheng-Lai, 2016: Quantifying the attribution of model bias in simulating summer hot days in China with IAP AGCM 4.1. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 9(6): 436-442.
- 林朝晖, 王坤, 肖子牛, 张贺, 詹艳玲. 2017. IAP AGCM4.0 模式对热带大气季节内振荡的模拟评估. *气候与环境研究*, 22 (2): 115–133.
- Su, T., F. Xue, and H. Zhang, 2014: Simulating the intraseasonal variation of the East Asian summer monsoon by IAP AGCM4.0. *Adv. Atmos. Sci.*, 31(3), 570-580.
- Wang, T., and H. Wang, 2013: Mid-Holocene Asian summer climate and its responses to cold ocean surface simulated in the PMIP2 OAGCMs experiments. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 4117–4128, doi:10.1002/jgrd.50287.
- YAN Zheng-Bin, LIN Zhao-Hui, ZHANG He, 2014: The Relationship between the East Asian Subtropical Westerly Jet and Summer Precipitation over East Asia as Simulated by the IAP AGCM4.0. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 7(6): 487-492.
- Zhang, H., M. Zhang, and Q. Zeng, 2013: Sensitivity of simulated climate to two atmospheric models: Interpretation of differences between dry models and moist models. *Mon. Wea. Rev.*, 141, 1558-1576.

附件清单:

- 附件 1: CAS-ESM 团队“率先行动”优秀荣誉证书;
- 附件 2: 重庆市气候中心应用证明
- 附件 3: 代表性论文[1]
- 附件 4: 代表性论文[2]
- 附件 5: 代表性论文[3]
- 附件 6: 代表性论文[4]
- 附件 7: 代表性论文[5]
- 附件 8: 代表性论文[6]

2020 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： 张振国 专业技术职务： 副教授 专业： 地球物理学

出生年月： 1987 年 9 月 17 日

工作单位： 南方科技大学

电子邮箱： 电话：

我郑重推荐 张振国 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：

2020 年 11 月 24 日

推荐人姓名： 陈晓非 专业技术职务： 教授 专业： 地球物理学

工作单位： 南方科技大学

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

☐ 国家重大科技项目首席科学家 ☐ 国际重要学术组织任职学者

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。

被推荐人张振国一直从事于计算地震学相关领域研究，探索用高性能计算手段解决地震学中的难题，为复杂地震的孕育、发生以及波场传播、地震灾害等提供更可靠的解释，在计算地震学相关领域取得重要研究成果，获得国内外同行广泛认可，**2017 年获得“戈登贝尔”奖，2018 年获得中国地球物理学会傅承义青年科技奖，2019 年获得国家自然科学基金优秀青年科学基金资助**，目前在南方科技大学地球与空间科学系任副教授/研究员，其研究成果主要包含以下几方面：

(1) 提出、改进以及完善非平面断层动力学数值模拟算法。被推荐人的重要学术贡献之一在于开发一套曲线有限差分方法程序用于模拟复杂断层上地震破裂的发生与传播过程，为研究真实复杂几何断层地震的震源物理研究提供有效工具。非平面断层上的自发破裂过程是震源研究中的难点，对理解复杂地震的物理机制以及有效指导防震减灾工作有重要的意义。经过众多地震学家的研究与发展，有限差分方法已成为模拟地震破裂动力学的一种有效方法。然而传统有限差分方法基于笛卡尔坐标，划分网格时需要构造规则的正交网格，对复杂几何断层上自发破裂问题束手无策。被推荐人将曲线有限差分方法引入到地震动力学破裂过程求解中，用于模拟复杂断层上地震破裂的发生与传播过程。该方法既保持了传统有限差分方法的优点，如计算效率高、容易施加等，又克服了传统有限差分方法在地震动力学模拟中几何划分不灵活的弱点，更是针对破裂断层与自由表面相交点的特殊性，提出了一套解决该处数学奇异性的差分方案（附件 1）。目前该曲线有限差分方法在模拟复杂断层方面有着较高的灵活性，可以用来模拟现实中常见的复杂几何断层上的动力学问题，如倾斜、弯曲、跳跃等断层，甚至包含不规则起伏自由表面的断层破裂问题，为研究真实环境中复杂断层体系中地震的孕育、发生以及由此导致的地震灾害提供有力的数值计算工具。

(2) 复杂断层的震源动力学研究。地表是地震动力学破裂的一个奇异界面，大量研究表明自由界面对地震破裂形态有非常重要的影响，例如超剪切破裂的产生与消亡等。初步的地震动力学研究大多考虑简单平直地表，但真实地表并非简单平面，而是存在不规则起伏。不规则地表能影响强地面运动的分布，同样也能调制断层自发破裂形态。被推荐人利用曲线有限差分方法模拟不同起伏地表情况下断层自发破裂过程，研究其对地震破裂的影响，特别是破裂速度的影响。研究表明不规则地表对地表激发的超剪切破裂有重要调制作用，并造成不同的近断层地震动分布，这对近场地震灾害研究与预防提供参考（附件 2，3）。被推荐人对地壳地震中常见的其他复杂几何断层面上地震动力学特征进行了研究，包括自由地表、粗糙断层、跳跃断层等。这些考

考虑真实复杂结构的震源物理研究有助于揭示地震物理规律，具有科学研究意义，同时也为地震自然灾害防治提供新思路。

(3) 地震学高性能计算。地震的孕育、发生与传播是一系列复杂的耦合过程，受到各种因素的共同约束，涉及到的时间与空间尺度跨度非常大。要准确、高效地模拟复杂地震的发生与传播需采用足够细的时空分辨以及足够大的时空范围，对计算能力有较高要求，必须借助于高性能计算平台。**被推荐人长期从事于地震相关的高性能数值模拟研究，用高效数值手段揭示地震的发生、传播以及致灾物理机理。**2017 年，被推荐人作为骨干参与的国产超计算机地震应用研究 18.9-Pflops Nonlinear Earthquake Simulation on Sunway TaihuLight: Enabling Depiction of 18-Hz and 8-Meter Scenarios 荣获 2017 年“戈登·贝尔”奖（附件 4、5）。除了国产硬件系统的高性能计算平台，被推荐人还致力于通用高性能应用平台的地震数值模拟算法研究。最近被推荐人成功开发了地震曲线有差分动力学破裂模拟的 GPU 算法，并实现了多卡 GPU 并行，大大提高了计算效率，相应成果见附件 6。此外，**被推荐人作为课题负责人参与国家重点研发计划高性能专项“基于国产 E 级系统的复杂地震模拟软件与应用示范”，负责基于国产 E 级系统的复杂地震波破裂与模拟程序的开发。**

(4) 复杂设定地震与实际地震数值模拟研究。被推荐人对最近发生在中国及周边地区的几次破坏性地震进行了快速强地面运动模拟与研究，并对特定历史断层上的潜在地震进行动力学破裂与强地面运动模拟，分析该设定地震所带来的地震灾害分布。对近实时地震动快速模拟与地震灾害估计能提供计算地震烈度分布，为震后受伤人员救援提供有效指导。对于可能发生地震的断层带，模拟其上的设定地震破裂、强地面运动传播可以定量预测未来可能地震所带来的灾害强度与分布，为城市抗震设计、大型工程选址与建设等提供地震科学参考。其中一个例子是关于太原城市群周边设定地震的灾害预测的算例（附件 7），该计算区域包括了众多山脉以及中间的太原盆地，在强地面运动模拟中施加了真实起伏地表。该研究探讨了不同起始成核区所导致的不同破裂形态以及强地面运动分布特征以及对市区造成最大灾害的地震情况。此设定地震的研究为该地区构造了发生 M7.5 级地震时的地震动分布情况，研究结果可以为抗震设计规划提供参考。此外，**被推荐人对已知破坏性地震如 2008 年汶川地震的动力学破裂过程开展研究（附件 8），推荐人首次在非平面断层上开展汶川地震的动力学破裂模拟，研究发现汶川地震的断层几何对断层滑动分布花样起着重要的控制作用，汶川地震的复杂几何结构造成了观测到的复杂的滑移过程，同时也可以得出，动力学模拟中地震的非平面效应必须考虑，这些高性能数值模拟研究为进一步认识汶川地震的破坏机理提供依据。**