

冰晶谱离散度参数化对亚洲夏季风云降水模拟的改进

贺欣¹, 陆春松^{1*}, 曹剑², 张文韬³, 王恒琪⁴, 朱磊¹, 李君俊⁵, 徐晓齐^{1,6}, 史湘军⁷, 王元⁸

1. 南京信息工程大学气候系统预测与变化应对全国重点实验室/中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044
2. 南京信息工程大学地球系统模拟中心, 南京 210044
3. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000
4. 中国科学院空天信息创新研究院, 遥感与数字地球全国重点实验室, 北京 100094
5. National Institute of Education (NIE), Nanyang Technological University (NTU), Singapore 637616, Singapore
6. 南京气象科技创新研究院, 中国气象科学研究院-江苏省气象局, 南京 210041
7. 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044
8. 兰州大学西部生态安全协同创新中心, 兰州 730000

* 通讯作者, E-mail: clu@nuist.edu.cn

2025-11-28收稿, 2026-02-15修回, 2026-03-31接受, 2026-05-20网络版发表

国家自然科学基金项目(42325503)、江苏省特聘教授计划项目(R2024T01)、国家重点研发计划青年科学家项目(2024YFB3908300)、地球系统数值模拟教育部重点实验室(清华大学)开放基金项目和气象灾害教育部重点实验室、气象灾害预报预警与评估协同创新中心开放基金项目(KLME202411)资助

摘要 气候模式对亚洲夏季风降水的模拟存在系统性偏差, 而云微物理过程的准确表征是影响其模拟性能的关键之一。联合地球系统模式(Community Integrated Earth System Model, CIESM)双参数总体云微物理方案将冰晶谱谱形参数假定为0, 与实际不符。针对该问题, 本研究改进了CIESM模式中冰晶谱离散度的参数化, 探究了新方案相较于默认方案对亚洲夏季风及相关区域云降水的模拟效果及物理机制。结果表明, 新方案相较于默认方案显著改进了对亚洲夏季风及相关区域6–9月平均云降水特征的模拟, 特别是缓解了默认方案在研究区域模拟总云云量的低估, 并减少了默认方案模拟阿拉伯海与西北印度洋总降水的高估以及模拟南亚区域总降水的不准确。本研究也阐明了背后的物理机制。在云模拟方面, 新方案相较于默认方案通过减弱冰晶向雪自动转化过程和增强冰晶凝华过程使高云云量增加, 通过减弱冰晶向雪自动转化过程和冰晶沉降过程使中云云量增加, 进一步通过辐射效应增强对流层低层稳定度, 促进低云生成, 最终使总云云量得到改进。在降水模拟方面, 新方案相较于默认方案增强了大气静力稳定度, 调整了区域水汽辐合和环流特征, 体现在新方案抑制了阿拉伯海与西北印度洋的水汽辐合与上升运动, 增强了南亚区域的水汽辐合与上升运动, 最终有效减小了默认方案模拟亚洲夏季风及相关区域降水的系统性偏差。本研究为提升气候模式对亚洲夏季风云降水的模拟性能提供了重要的参考依据。

关键词 亚洲夏季风, 云降水模拟, 冰晶谱离散度, 气候模式

1 引言

亚洲夏季风作为全球典型的季风系统之一, 其带来的降水直接决定了亚洲地区水资源的时空分布, 对全球极端气候事件的发生频率及强度乃至人类社会的发展具有

重要影响(Wang和Fan, 1999; Yang等, 2015a; Li等, 2016; Cui等, 2019; Hu等, 2020; Wilcox等, 2020; Pathak等, 2021; Li等, 2022)。尽管气候模式在近年来飞速发展, 但当前气候模式对于准确模拟亚洲夏季风及相关区域的降水仍具挑战性(Zhou和Li, 2002; Boo等,

中文引用格式: 贺欣, 陆春松, 曹剑, 张文韬, 王恒琪, 朱磊, 李君俊, 徐晓齐, 史湘军, 王元. 2026. 冰晶谱离散度参数化对亚洲夏季风云降水模拟的改进. 中国科学: 地球科学, 56(6): 2112–2123, doi: [10.1360/SSTe-2025-0413](https://doi.org/10.1360/SSTe-2025-0413)

英文引用格式: He X, Lu C, Cao J, Zhang W, Wang H, Zhu L, Li J, Xu X, Shi X, Wang Y. 2026. Improving Asian summer monsoon cloud and precipitation simulations through an ice crystal spectral relative dispersion parameterization. Science China Earth Sciences, 69(6): 2062–2073, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1924-x>

2011; Chang等, 2013); 特别是存在高估阿拉伯海与西北印度洋的降水但低估南亚区域降水的系统性偏差(Hanf和Annamalai, 2020; Pathak等, 2021)。降水的发生与云的发展直接相关, 但当前气候模式的网格分辨率远大于云物理过程发生的次网格尺度, 直接导致气候模式无法显式解析关键的云物理过程, 必须通过参数化对云物理过程进行表征, 这是当前气候模式模拟结果存在偏差的重要因素之一(Yang等, 2015b; Ma等, 2018, 2021a, 2021b; Hanf和Annamalai, 2020; Pathak等, 2021; 贺欣等, 2024; 李君俊等, 2025)。Hanf和Annamalai(2020)在亚洲夏季风的模拟研究中指出阿拉伯海与西北印度洋区域的对流过度发展, 通过修改对流参数可以抑制云的垂直发展, 减少该区域的降水湿偏差, 进而缓解南亚区域的降水干偏差。Pathak等(2021)在通用大气模式的深对流方案中引入了随机夹卷过程, 有效缓解了模式模拟亚洲夏季风降水的系统性偏差。

云微物理过程作为云降水形成的核心环节, 主导着云内水成物(云滴、雨滴、冰晶、雪等粒子)的生成、增长、相变和消亡, 这会直接影响天气和气候系统的演变(Morrison和Gettelman, 2008; Xu等, 2020; Ma等, 2021a)。不同云微物理方案在模拟云降水方面存在显著差异(Lin等, 1983; 尹金方等, 2014; Morrison和Milbrandt, 2015; Hazra等, 2017; Xu等, 2020; Ma等, 2021a, 2022)。相较于暖云, 冰云微物理过程更为复杂, 在模式中对其进行准确描述更具挑战性(Morrison和Milbrandt, 2015; Hazra等, 2017; Ma等, 2021a; Lin等, 2025)。Ma等(2021a)在全球区域同化预报系统中引入了两个冰晶凝华/升华参数化方案, 发现两个方案都显著缓解了默认方案模拟华北地区降雪量的高估。大量研究表明, 冰相云微物理过程是调控亚洲夏季风降水的关键环节。例如, Hazra等(2017)利用美国国家环境预报中心气候预测系统设计了仅考虑暖雨微物理过程和包含暖雨、冷雨微物理过程的两组敏感性试验, 发现考虑冷雨微物理过程会显著提升对印度夏季风云降水的模拟能力; Lim和Hong(2005)将Hong等(2004)提出的一种改进的冰微物理方案应用于第五代宾夕法尼亚州立大学/美国国家大气研究中心中尺度模式中, 发现新方案改进了东亚夏季风降水的空间分布; Dutta等(2022)基于再分析数据指出, 印度次大陆上的云微物理过程速率的空间分布与降水分布一致, 冰相云微物理过程在天气尺度对季风降水具有关键调控作用, 并强调了在气候模式中改进云微物理方案对提升印度夏季风降水模拟的重要性。

当前气候模式的云微物理方案通常采用伽马分布函

数来描述粒子的尺度分布特征($\phi(D) = N_0 D^\mu e^{-\lambda D}$)(Morrison和Gettelman, 2008; 贺欣等, 2023), 其中 D 为粒子直径, N_0 为截距参数, λ 为斜率参数, μ 为谱形参数。 μ 直接决定了粒子谱的分布形态, 与粒子谱分布的离散度(ε)成反比($\mu=1/\varepsilon^2-1$), 当 μ 值越大时, 粒子谱分布越窄, 云粒子尺度相近, 离散度越小; 反之, 当 μ 值越小时, 粒子谱分布越宽, 云粒子尺度有大有小, 离散度越大, 这会显著影响云的发展和降水的形成(Zhang等, 2022; 贺欣等, 2024; Lin等, 2025)。为了节省计算资源, 目前气候模式广泛采用的双参数总体云微物理方案通过同时预报云滴和冰晶的质量浓度和数浓度, 可以得到云滴和冰晶谱分布中 N_0 和 λ 的演变(Morrison和Gettelman, 2008; Wang等, 2020; Lin等, 2025)。在联合地球系统模式(Community Integrated Earth System Model, CIESM)中, 云滴谱的 μ 值是基于暖层积云观测结果所建立的 ε 与云滴数浓度之间的关系计算得到的(Martin等, 1994; Morrison和Gettelman, 2008); 但冰晶粒子谱的 μ 值(μ_i)被假定为0(Morrison和Gettelman, 2008), 这不符合实际大气中云的冰晶粒子谱分布呈动态变化的特征(Lin等, 2025)。虽然三参数云微物理方案能实现冰晶谱谱形参数的预报, 但是这种处理方式通过引入额外的预报量增加了模式的计算负担。因此, 本研究将采用Zou等(2022)基于冰晶质量浓度和数浓度建立的冰晶粒子谱离散度参数化以完善气候模式对冰相云微物理过程的描述, 该方案既能实现冰晶谱谱形参数的诊断, 又能节省计算资源(Lin等, 2025)。

针对气候模式对亚洲夏季风及相关区域降水模拟的不足, 同时鉴于云微物理方案对季风降水模拟的重要性以及冰晶粒子谱谱形参数被假定为常数0的局限性, 本研究将采用Zou等(2022)发展的冰晶粒子谱离散度参数化, 对CIESM模式中的云微物理方案进行改进。本研究旨在评估新方案对亚洲夏季风及相关区域云降水模拟的改进效果, 并进一步揭示背后的物理机制。研究结果不仅有助于深化对亚洲夏季风及相关区域云降水过程物理机制的理解, 也为提升气候模式对该区域云降水的模拟精度提供了科学依据。

2 冰晶谱离散度参数化和模式设置

2.1 冰晶谱离散度参数化

云粒子体积平均直径被广泛用于云粒子谱离散度的研究(Tas等, 2012; Lu等, 2020; Wang等, 2023)。因此, Zou等(2022)利用天气研究和预报(Weather Research

and Forecasting, WRF)模式结合谱分档微物理方案,通过建立离散度和体积平均直径之间的关系发展了不同水成物谱分布的离散度参数化方案,其中冰晶谱离散度参数化为

$$\varepsilon_i = -48.26D_{vi}^{3.00} + 0.56 \quad (1)$$

其中, ε_i 是冰晶粒子谱分布的离散度, D_{vi} 为冰晶粒子的体积平均直径(单位: mm)。 D_{vi} 是通过模式预报的冰晶质量浓度(q_i)和冰晶数浓度(N_i)计算得到的:

$$D_{vi} = \left(\frac{q_i}{cN_i} \right)^{1/3} \times 10^3 \quad (2)$$

其中, $c = \rho_i \pi / 6$ (假设冰晶粒子为球形), ρ_i 为冰晶粒子的密度。

基于以上的冰晶谱离散度参数化,本研究可以根据 ε 与 μ 之间的单调关系($\mu = 1/\varepsilon^2 - 1$)诊断出 μ_i ,改进CIESM模式中假定 μ_i 为0的默认双参数总体云微物理方案。 μ_i 的表达式为

$$\mu_i = 1 / \left(-48.26D_{vi}^{3.00} + 0.56 \right)^2 - 1 \quad (3)$$

由于 μ_i 还会直接影响冰晶向雪自动转化、冰晶凝华以及冰晶沉降过程,因此,本研究在这三个云微物理过程中考虑了 μ_i 的影响,具体详见贺欣等(2023)。

2.2 模式介绍及试验设置

由清华大学联合其他单位研发的CIESM1.1.0版本是以通用地球系统模式(Community Earth System Model, CESM)1.2.1版本为基础的耦合地球系统模式,旨在模拟全球和区域的气候变化,提高气候预测的准确度(Lin等, 2020)。本研究采用的默认云微物理方案是Morrison和Gettelman(2008)发展的双参数总体云微物理方案,预报变量包括云滴和冰晶粒子的质量浓度和数浓度,雨滴和雪粒子的质量浓度和数浓度通过诊断得到。其余关键的物理过程参数化方案包括:宏物理方案(Park等, 2014),深对流方案(Zhang和McFarlane, 1995),浅对流方案(Park和Bretherton, 2009)和快速辐射传输方案(Iacono等, 2008)。

本研究基于CIESM模式共开展两组试验来模拟亚洲夏季风及相关区域云降水相关特征,分别是假定 μ_i 为0的默认方案(Def),以及通过Zou等(2022)建立的冰晶谱离散度参数化诊断出 μ_i 的新方案(New)。两个试验的水平分辨率为 1.9° 纬度 $\times 2.5^\circ$ 经度,垂直分辨率为30层。模式选取的算例是F_2000_CAM5,采用气候态的海温和海冰数据对模式进行驱动。和Gettelman等(2015)的研究类似,本研究的两个试验均运行了6年,将第1年作为预热时间,采用后5年进行分析。

2.3 观测数据及研究区域

CloudSat和云-气溶胶激光雷达和红外探路者卫星观测(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation, CALIPSO)是美国国家航空航天局发起的地球观测任务,旨在获得全球云和气溶胶等相关信息。本研究使用的全球低云、中云、高云以及总云的观测数据由CloudSat-CALIPSO提供(<https://www.cloudsat.cira.colostate.edu/>)(Stephens等, 2002),时间范围为2006–2011年。总降水率观测数据来自全球降水气候计划(Global Precipitation Climatology Project, GPCP)数据集(<https://www.ncei.noaa.gov/data/global-precipitation-climatology-project-gpcp-daily/>)(Huffman等, 2001),时间范围为1996–2005年。风场的参考数据来自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)第五代再分析数据集(ERA5)(<https://cds.climate.copernicus.eu/>)(Hersbach等, 2020),时间范围为1995–2005年。

季风气候干湿季分明,表现为夏季降水充沛,冬季干燥少雨,其显著的季节性降水变化是界定季风的关键因子。季风区定义为降水年变幅(当地夏季与冬季降水差值)超过 2 mm d^{-1} ,且当地夏季降水占年降水55%以上的区域,这里当地夏季指5–9月(MJJAS),当地冬季指11月至次年3月(NDJFM)(Liu等, 2009; Hsu等, 2013; Qu和Huang, 2019)。基于上述定义,我们使用GPCP数据集识别出的全球季风区如网络版附图S1所示。根据Wang和Ding(2006)和Liu等(2009),北半球夏季风降水强度(NMI)定义为观测到的北半球季风区的6–8月平均降水,南半球夏季风降水强度(SMI)定义为观测到的南半球季风区的12月至次年2月平均降水。新方案(7.35 、 6.94 mm d^{-1})模拟的NMI和SMI相较于默认方案(7.55 、 7.39 mm d^{-1})均更接近GPCP观测结果(7.25 、 6.32 mm d^{-1}),表明新方案提升了模式对全球季风区域降水的模拟能力。亚洲夏季风作为全球最具代表性的季风系统之一,其相关区域的云降水特征被广泛研究(Bush等, 2015; Hanf和Annamalai, 2020; Pathak等, 2021)。根据Bush等(2015),本研究将亚洲夏季风及相关区域定义为 20°S – 40°N , 45°E – 180° (附图S1)。

3 结果

3.1 冰晶谱离散度参数化对亚洲夏季风及相关区域云降水特征的影响

考虑到云降水在调节亚洲夏季风及相关区域能量和水循环中的关键作用及其对区域乃至全球气候变化的重

要贡献,本研究考察了新方案对研究区域云降水特征的影响。参考Bush等(2015), Hanf和Annamalai(2020)以及Pathak等(2021)对亚洲夏季风的研究,本文选取6–9月作为研究时段进行分析。基于CloudSat-CALIPSO观测,我们评估了研究区域内新方案相较于默认方案6–9月平均低云量(CLDLOW, 低于700 hPa)、中云量(CLDMED, 400–700 hPa)、高云量(CLDHGH, 高于400 hPa)以及总云量(CLDTOT)的模拟能力(图1)。整体来看,与CloudSat-CALIPSO观测相比,默认方案对研究区域内6–9月平均的CLDLOW、CLDMED、CLDHGH以及CLDTOT的模拟均存在低估,偏差分别为−4.99%、−7.01%、−6.46%和−8.26%,而新方案明显增加了CLDLOW(2.39%)、CLDMED(6.51%)、CLDHGH(14.2%)及CLDTOT(11.8%)。结果表明,新方案较默认方案对低云、中云和总云量的模拟改进显著,与观测更接近。

降水是亚洲夏季风及相关区域的重要体现,其形成和分布会直接受到云特征变化的影响,同时与风场结构密切相关,因此本研究检验了新方案相较于默认方案对研究区域降水及风场特征的影响(图2)。从图2A–2C可以看出,阿拉伯海-孟加拉湾-南海一带存在明显的西南季风气流,有助于大规模水汽输送,形成雨带。相较于ERA5数据集,默认方案在阿拉伯海与西北印度洋(A-I)表现为异常气旋性环流,促进该区域降水的形成,而抑制了输送至南亚区域(SA)的水汽(图2D)。相应地,相较于GPCP数据集,默认方案高估了A-I区域的总降水,区域平均差值(Bias_Def)为3.81 mm d^{−1},均方根误差(RMSE_Def)为4.32 mm d^{−1};而默认方案低估了SA区域的总降水,Bias_Def为−1.27 mm d^{−1},RMSE_Def为4.17 mm d^{−1},这是气候模式模拟亚洲夏季风及相关区域降水的系统性偏差(Hanf和Annamalai, 2020; Pathak等, 2021)。新方案明显减少了默认方案对A-I和SA区域总降水的模拟偏差,其相较于GPCP数据集的区域平均差值(Bias_New)分别为2.93、0.192 mm d^{−1},均方根误差(RMSE_New)分别降低为3.62、3.92 mm d^{−1}。结果表明,新方案相较于默认方案有效调整了亚洲夏季风及相关区域的总降水空间分布特征,使模拟结果与GPCP观测更接近(图2D–2F)。值得注意的是,新方案与默认方案总降水差异的空间分布(图2E)主要由对流降水主导,大尺度降水的影响相对较小(附图S2)。

图1和2表明,新方案在模拟研究区域内6–9月平均的云降水特征方面优于默认方案。通过进一步对比研究区域内默认方案和新方案对云降水月变化特征的模拟结果(附图S3和S4)发现,新方案模拟的低云、中云、总云量以及总降水的逐月平均气候态较默认方案均更接近

CloudSat-CALIPSO和GPCP观测。以上结果证实了新方案在模拟逐月平均气候态方面具有与季节平均一致的改进效果,增强了本研究模拟结果的可靠性。

3.2 物理机理

3.2.1 冰晶谱离散度参数化对亚洲夏季风及相关区域云模拟改进的机理

默认方案将 μ_i 简单假定为0值,冰晶粒子谱离散度大,难以准确反映实际大气中冰晶粒子的微物理特征。新方案则根据冰晶的质量浓度和数浓度诊断得到 μ_i ,冰晶粒子谱离散度相对较小,更符合实际观测(Heymsfield, 2003; Lin等, 2025)。如图3所示,对流层内亚洲夏季风及相关区域的 μ_i 值分布在0 °C等温线以上的区域,说明冰晶粒子的形成和演变主要发生在对流层中上层的冰相云和混合相云中,这与该区域强烈的对流活动密切相关。亚洲夏季风及相关区域的 μ_i 值在2–4范围内(图3),这与以往研究较为一致。比如,Heymsfield(2003)基于多个热带和中纬度的观测数据指出, μ_i 值在−2–4范围;Lin等(2025)利用ICE-T(Ice in Clouds Experiment-Tropical)试验的观测资料发现 μ_i 值范围为0–10,主要分布在1–4;贺欣等(2024)将建立的三参数冰相云微物理方案应用到CIESM模式中发现中低纬度地区的 μ_i 值在0–9范围内,主要分布在0–3。

由于冰晶谱离散度参数化会直接影响冰晶向雪自动转化、冰晶凝华以及冰晶沉降过程,因此我们进一步考察了新方案对这三个云微物理过程的影响(图4)。相较于默认方案,新方案通过诊断 μ_i 使冰晶粒子谱变窄,大粒子端的冰晶向小粒子端移动,冰晶向雪自动转化过程减弱(图4A–4C)。由于冰晶凝华过程中的云内凝华率与过饱和和弛豫时间尺度(τ_{phase})的倒数成正比(Morrison和Gettelman, 2008),从图4D–4F可以看出,1/ τ_{phase} 随着 μ_i 的增加而增大,表明新方案相较于默认方案的冰晶凝华过程明显增强。冰晶粒子的沉降过程会同时受到 μ_i 和冰晶粒子体积平均半径的影响,导致新方案相较于默认方案的冰晶质量加权下落末速度在不同高度层表现出非单调变化特征(图4G–4I)。贺欣等(2024)和Lin等(2025)也发现在中低纬度地区,随着 μ_i 的增大,冰晶向雪自动转化以及冰晶凝华过程分别会减弱和增强,而冰晶沉降过程在不同区域变化趋势不一致。

如图4所示,冰晶向雪自动转化、冰晶凝华以及冰晶沉降过程均发生在0 °C等温线以上的高度,而中、高云的高度分别为400–700和400 hPa以上,会直接受到以上三个云微物理过程的影响。在400 hPa以上的高度层,相较于默认方案,虽然新方案的冰晶沉降过程增强会使大气中

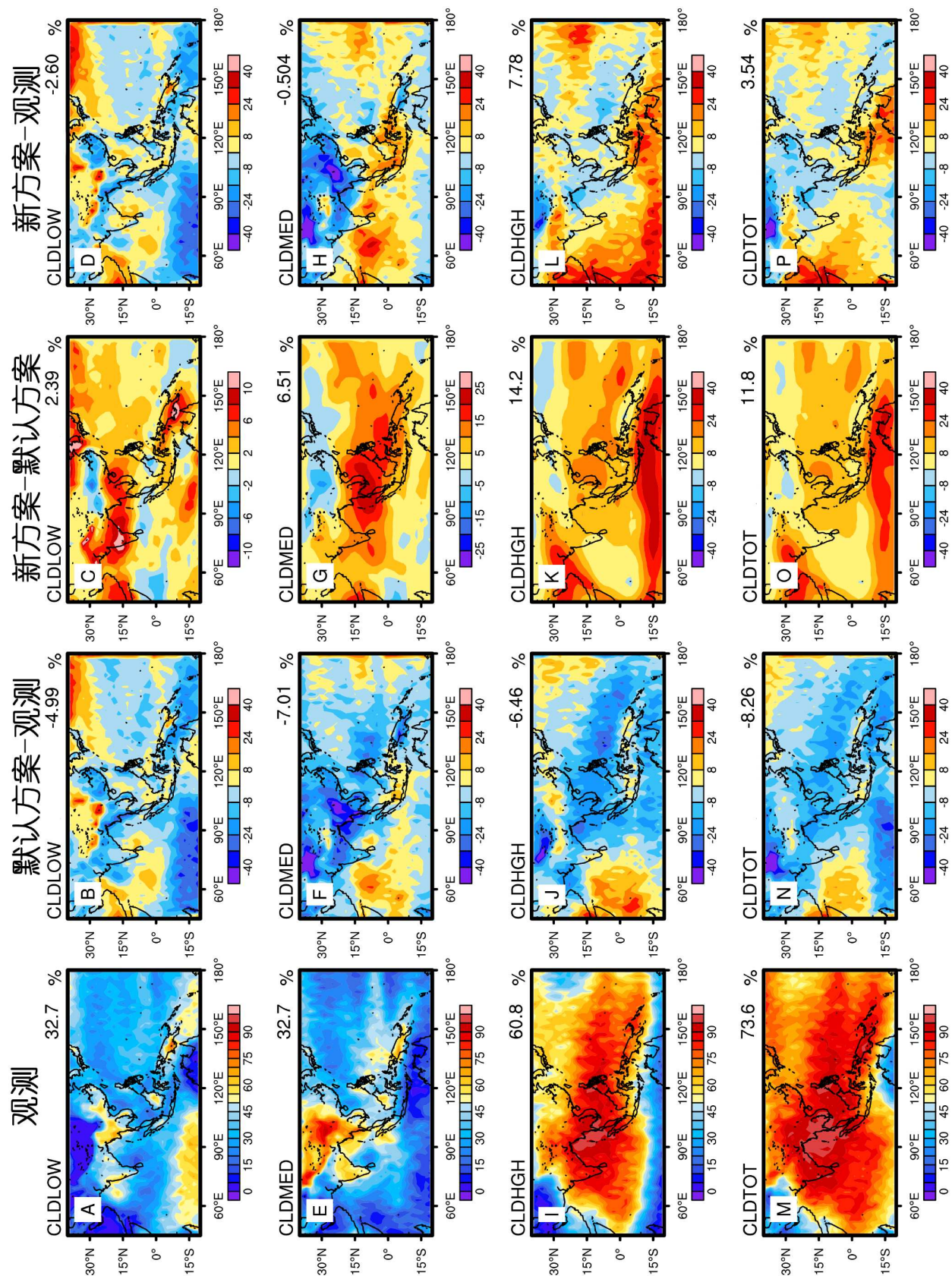


图1 6-9月平均的低云量(CLDLOW, 单位: %)(A-D)、中云量(CLDMED, 单位: %)(E-H)、高云量(CLDHGH, 单位: %)(I-L)以及总云量(CLDTOT, 单位: %)(M-P)的空间分布。第一到第四列依次展示了CloudSat-CALIPSO观测、默认方案与默认方案、新方案与默认方案以及新方案与默认方案的空间分布。各个子图右上方标注了研究区域平均值

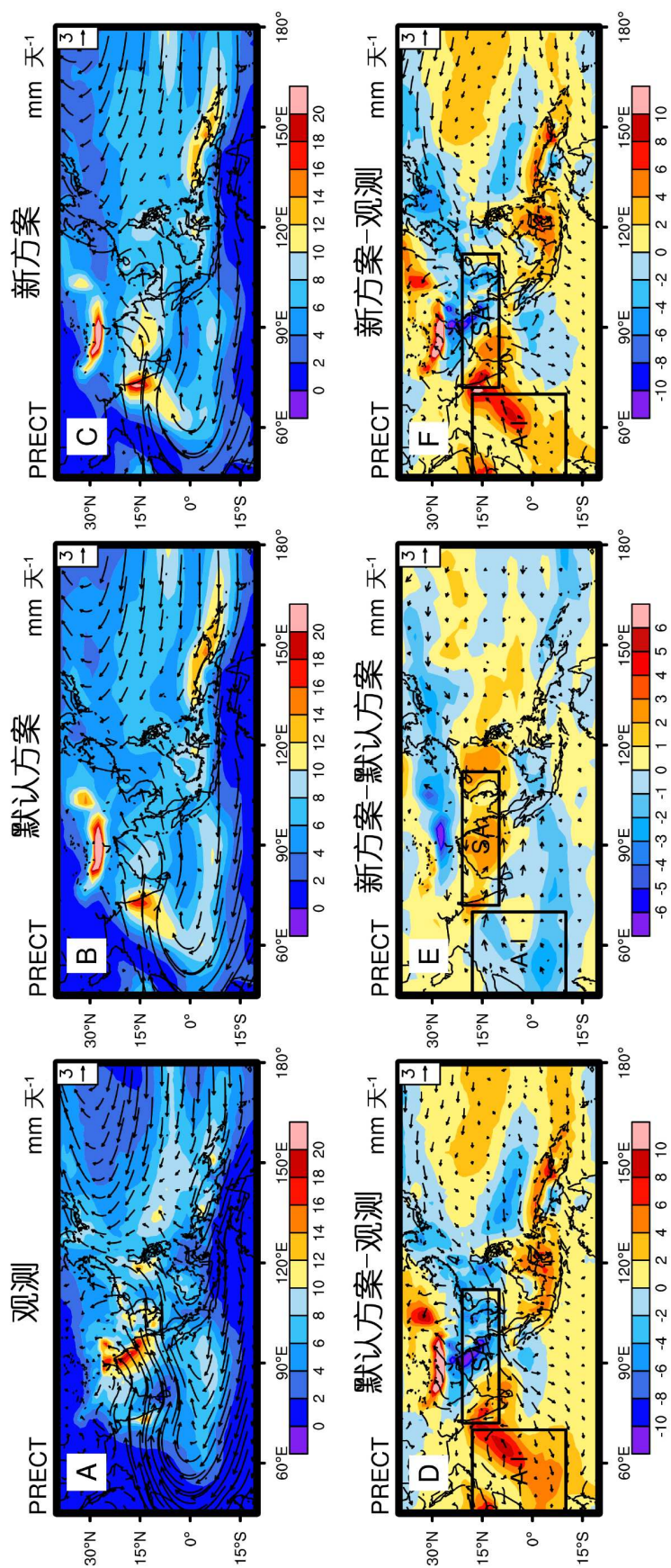


图2 6-9月平均的总降水率(阴影)(PRECT, 单位: mm d^{-1})及850 hPa水平风(箭头)(单位: m s^{-1})的空间分布。降水率和风场的观测数据分别来自GPCP和ECMWF-ERA5(A), 模拟结果分别来自默认方案(B)和新方案(C)。图中还展示了默认方案与观测(D)、新方案与默认方案(E)以及新方案与观测(F)差异的空间分布。图中标注为A-I(10°S-18°N, 45°-70°E)和SA(10°-21°N, 72°-112°E)的黑色方框分别代表阿拉伯海与西北印度洋和南亚区域

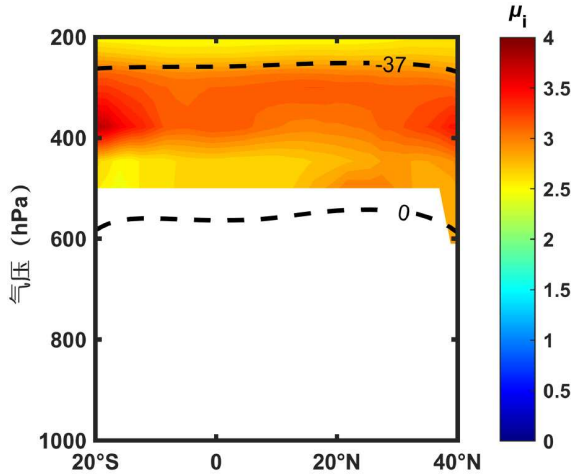


图3 新方案模拟的在45°E–180°范围内6–9月平均的冰晶谱形参数(μ_i)的纬度-气压剖面。两条黑色虚线分别为0和-37 °C等温线。空白区域表示冰云出现概率小于0.01

的冰晶质量浓度减少,但不及新方案冰晶向雪自动转化过程的减弱以及冰晶凝华过程的增强对冰晶质量浓度的增加作用(图4),最终导致高云云量增加(图1K)。在400–700 hPa之间,新方案的冰晶向雪自动转化过程和冰晶沉降过程都较默认方案减弱(图4),冰晶凝华过程变化不大,导致中云云量增加(图1G)。间接地,默认方案和新方案中、高云云量差异引起的辐射效应会进一步影响低云云量的模拟。新方案相较于默认方案中云和高云云量的增加,能有效吸收更多来自地表和低层大气向上发射的长波辐射,同时云层自身也会向上和向下再发射辐射,使向太空发射的长波辐射减少,模式顶净长波辐射通量减少 24.0 W m^{-2} ,最终使大气的增温作用随高度增加而增强(附图S5),导致对流层低层稳定度(定义为700 hPa与近地面的位温差)增加(图5),这促进了低云的形成(Sun等, 2011)(图1C)。相较于默认方案,新方案增加了低云、中云以及高云云量,从而增大了总云云量,使其更接近观测(图1)。贺欣等(2024)和Lin等(2025)利用全球气候模式也发现,将 μ_i 由0改进为动态的正值后,低云、中云、高云和总云云量整体均有所增加。

3.2.2 冰晶谱离散度参数化对亚洲夏季风及相关区域降水模拟改进的机理

Hanf和Annamalai(2020)和Pathak等(2021)指出当前气候模式模拟的亚洲夏季风及相关区域降水存在系统性偏差,即阿拉伯海与西北印度洋的总降水模拟存在湿偏差,而南亚区域的总降水模拟存在干偏差;如图2D所示,CIESM模式也存在类似问题。Hanf和Annamalai(2020)发现,气候模式对西北印度洋降水模拟的湿偏差主要是由

于对流层水汽过剩和来自索马里近海的低层冷干空气水平平流受到抑制。因此,若能抑制阿拉伯海与西北印度洋的水汽辐合或者促进低层冷干空气平流,将有助于缓解模式模拟该区域降水的湿偏差。本研究的新方案通过引入相较于默认方案更真实的可变的 μ_i ,显著影响了冰云微物理过程,随后引起的云量变化产生了显著的辐射效应。具体而言,新方案相较于默认方案中云和高云云量的增加(图1G和1K),导致中高层大气显著增温,低层大气增温幅度较小(附图S5),这种“上强下弱”的非均匀大气垂直加热结构,与促进低层冷干空气平流引起的效应类似,会导致整个对流层的大气静力稳定度(SS)增强(图6),进一步会抑制对流活动的发生与发展(Fowler和Randall, 1994; Lin等, 2025)。这里的SS定义为(Bluestein, 1992)

$$SS = -T \times \frac{\partial \ln \theta}{\partial p} \quad (4)$$

其中, T 是大气温度, θ 为位温, p 是气压。

大气静力稳定度的变化会进一步影响到区域水汽输送与辐合特征(图7)。首先给出垂直积分水汽通量(VIMT)的计算公式(Cordeira等, 2013; Chansaengkra-chang等, 2018):

$$\text{VIMT} = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q \vec{V} dp \quad (5)$$

其中, g 是重力加速度, q 是比湿, $\vec{V}$ 是水平风矢量, p_s 为1000 hPa, p_t 为200 hPa。VIMT的纬向分量(VIMT_u)和经向分量(VIMT_v)分别为

$$\begin{aligned} \text{VIMT}_u &= -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q u dp \\ \text{VIMT}_v &= -\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q v dp \end{aligned} \quad (6)$$

垂直积分水汽通量散度(VIMD)为(Chansaengkra-chang等, 2018)

$$\begin{aligned} \text{VIMD} &= \nabla \cdot \left(-\frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q \vec{V} dp \right) \\ &= - \left[\frac{\partial \left(\int_{p_s}^{p_t} q u dp / g \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\int_{p_s}^{p_t} q v dp / g \right)}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

若VIMD为负值,代表水汽辐合;VIMD为正值,代表水汽辐散。

新方案相较于默认方案在整个研究区域的对流层大气静力稳定度均增强,但是对A-I和SA区域的降水却会产生不同的影响。对于默认方案降水模拟存在湿偏差的A-I区域,新方案相较于默认方案大气静力稳定度增加

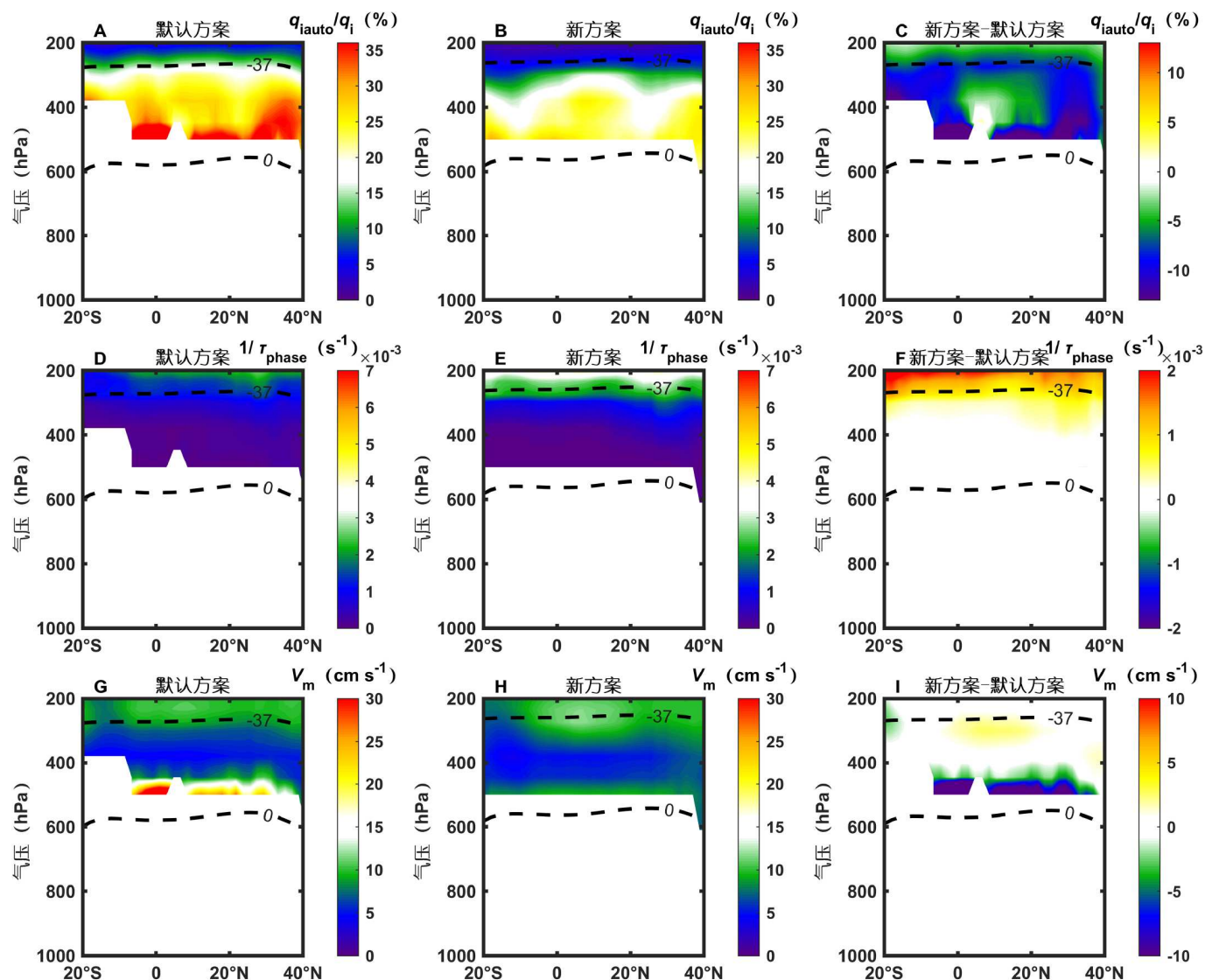


图4 默认方案和新方案模拟的在45°E–180°范围内6–9月平均的冰晶向雪自动转化过程中质量浓度的转化率(q_{iauto}/q_i , 单位: %)(A–B)、冰晶凝华过程中过饱和弛豫时间的倒数($1/\tau_{phase}$, 单位: s^{-1})(D–E)以及冰晶沉降过程中冰晶质量加权下落末速度(V_m , 单位: $cm\ s^{-1}$)(G–H)的纬度-气压剖面及其差异(C、F和I)。两条黑色虚线分别为0和–37 °C等温线。空白区域表示冰云出现概率小于0.01

(图6C), 对流活动受到抑制, 水汽通量呈现反气旋性环流, 水汽辐合减弱(图7C)。具体而言, 新方案模拟的A-I区域平均水汽通量散度从默认方案的 $-0.06\ g\ m^{-2}\ s^{-1}$ 增加到 $-0.04\ g\ m^{-2}\ s^{-1}$, 使得默认方案在该区域形成虚假强降水的多余水汽得以重新分配, 从而有效减少了默认方案在该区域模拟的降水湿偏差。新方案也会缓解默认方案在SA区域模拟的降水干偏差(图2), 这得益于环流变化的影响。具体表现为新方案相较于默认方案在SA区域的水汽通量呈现气旋性环流, 水汽辐合增强(图7C), 新方案的区域平均水汽通量散度从默认方案的 $-0.03\ g\ m^{-2}\ s^{-1}$ 减小到 $-0.08\ g\ m^{-2}\ s^{-1}$, 为对流提供了充足的水汽来源, 降水增加。上述结果也得到图2D和2E的支撑, 以ERA5

数据集为参考, 默认方案在A-I区域存在异常气旋性环流, 而新方案相较于默认方案在该区域模拟的850 hPa风场呈现反气旋环流, 促进了西南季风气流, 更好地再现了风场特征, 从而抑制了该区域的降水; 对于SA区域, 新方案抑制了默认方案在该区域的异常反气旋性环流, 从而促进了该区域的降水。与Hanf和Annamalai(2020)的研究类似, 他们通过增大夹卷率缓解了在A-I区域模拟的降水高估, 而局地环流特征的进一步变化改进了在SA区域模拟的降水低估。

降水场的重新分配也会影响局地环流特征(Hanf和Annamalai, 2020), 如图8所示, 在新方案相较于默认方案降水减少的A-I区域上升运动减弱, 而在降水增多的SA

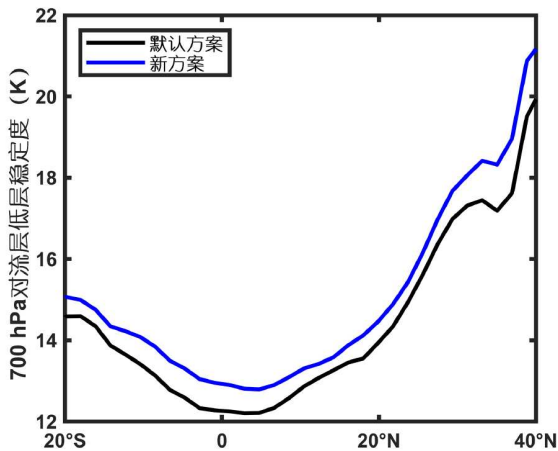


图5 默认方案和新方案模拟的在45°E–180°范围内6–9月平均的700 hPa对流层低层稳定度(单位: K)的纬度分布

区域上升运动增强。这种环流调整不仅是降水变化的响应,也会进一步影响水汽再分配,形成正反馈机制,即减弱的上升运动会抑制水汽辐合和对流活动的发生发展,从而减少A-I区域的降水,而SA区域增强的上升运动会促进水汽辐合和对流活动,导致降水增加。降水和云量之间相互反馈,表现为新方案的总云云量相较于默认方案在A-I区域增加较少,而在SA区域增加较多(图10和2E)。另外,贺欣等(2024)和Lin等(2025)的研究指出,中低纬度的降水整体会随着 μ_i 增大而减小,主要是由于大气静力稳定度增加,抑制了对流发展,这进一步强调了区域季风环流对降水空间分布独特的调节作用。

4 结论

当前气候模式在模拟亚洲夏季风及相关区域的云降水特征方面存在偏差,其部分原因在于云微物理方案的不确定性。在联合地球系统模式默认的双参数总体云微物理方案中,冰晶谱谱形参数(μ_i)被假定为0,这一简化

处理存在局限性。因此,本研究通过引入Zou等(2022)建立的冰晶谱离散度参数化方案,根据谱形参数和离散度之间的单调关系,得到 μ_i 的诊断关系式(公式(3)),系统评估了新参数化方案对亚洲夏季风及相关区域云降水特征的模拟效果,并进一步揭示了背后的物理机制。本研究为改进气候模式中云微物理参数化方案和深入理解亚洲夏季风及相关区域云降水过程物理机制提供了科学依据。本研究的主要结论如下:

(1)新参数化方案显著改进了对亚洲夏季风及相关区域云降水特征的模拟。对于6–9月平均的云模拟,默认方案对低云、中云、高云和总云云量的模拟存在较大低估,新方案较默认方案使各类云量明显增加,显著改进了对低云、中云和总云云量的模拟。对于6–9月平均的降水模拟,与全球降水气候计划GPCP数据集相比,默认方案高估了阿拉伯海与西北印度洋的总降水(3.81 mm d^{-1}),低估了南亚区域总降水(-1.27 mm d^{-1}),而新方案有效改进了以上两个区域的降水模拟偏差,其相较于GPCP数据集的区域平均差值分别减少到 2.93 、 0.192 mm d^{-1} ,使亚洲夏季风及相关区域的降水空间分布与观测更接近。

(2)本文揭示了新参数化方案对亚洲夏季风及相关区域6–9月平均云降水模拟改进的物理机制。对于云模拟的改进,相较于默认方案,新方案通过减弱冰晶向雪自动转化过程和增强冰晶凝华过程使高云云量增加,通过减弱冰晶向雪自动转化过程和冰晶沉降过程使中云云量增加。新方案中云和高云云量增加引起的辐射变化使对流层低层稳定度增加,促进低云的生成,最终使总云云量增加,更接近观测。对于降水模拟的改进,新方案相较于默认方案通过辐射效应增强了整个对流层的大气静力稳定度,有效调整了研究区域的水汽辐合和环流特征。具体来说,新方案与默认方案相比在阿拉伯海与西北印度洋的水汽辐合减小(区域平均水汽通量散度从 $-0.06 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 增加到 $-0.04 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、上升运动减弱,而

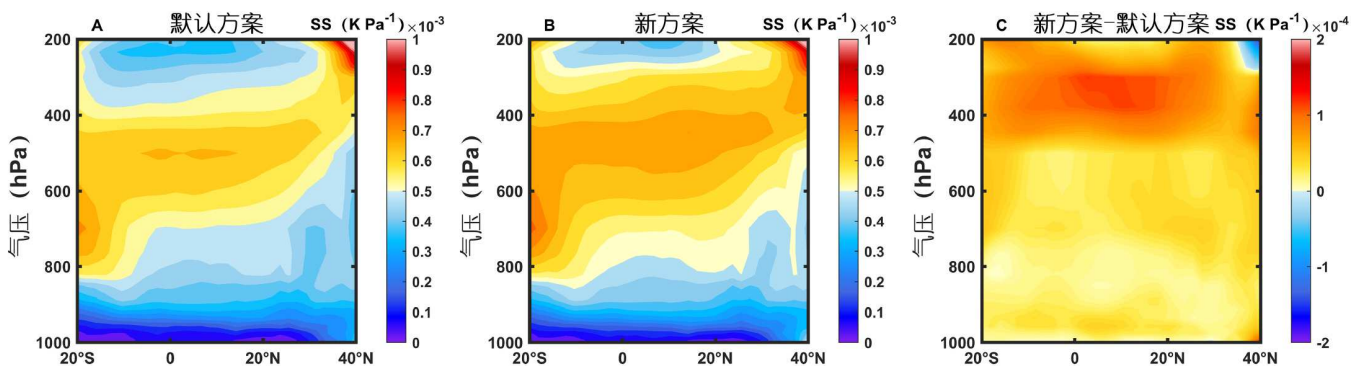


图6 默认方案(A)和新方案(B)模拟的在45°E–180°范围内6–9月平均的大气静力稳定度(SS, 单位: K Pa^{-1})的纬度-气压剖面及其差异(C)

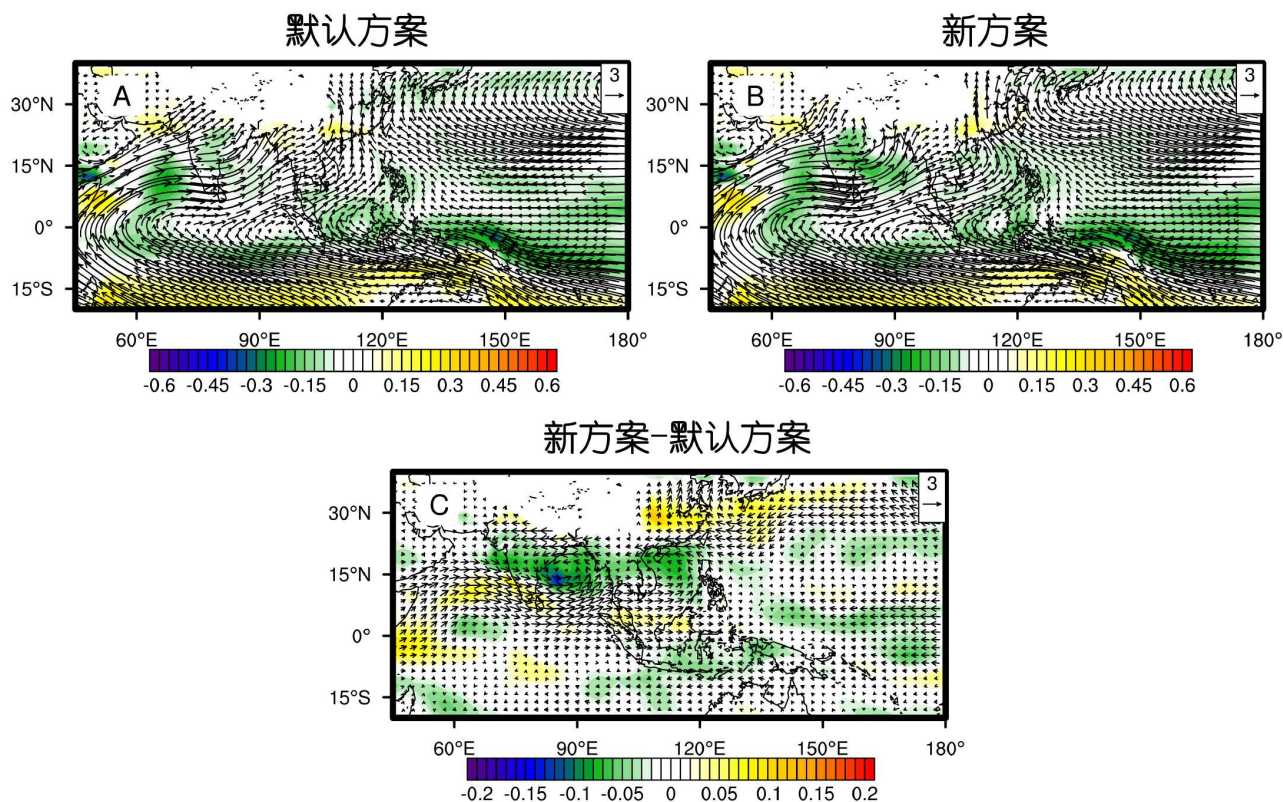


图7 默认方案(A)和新方案(B)模拟的6-9月平均的1000-200 hPa垂直积分水汽通量(箭头)(单位: $10^5 \text{ g m}^{-1} \text{ s}^{-1}$)及其散度(阴影)(单位: $\text{g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)的空间分布及其差异(C)

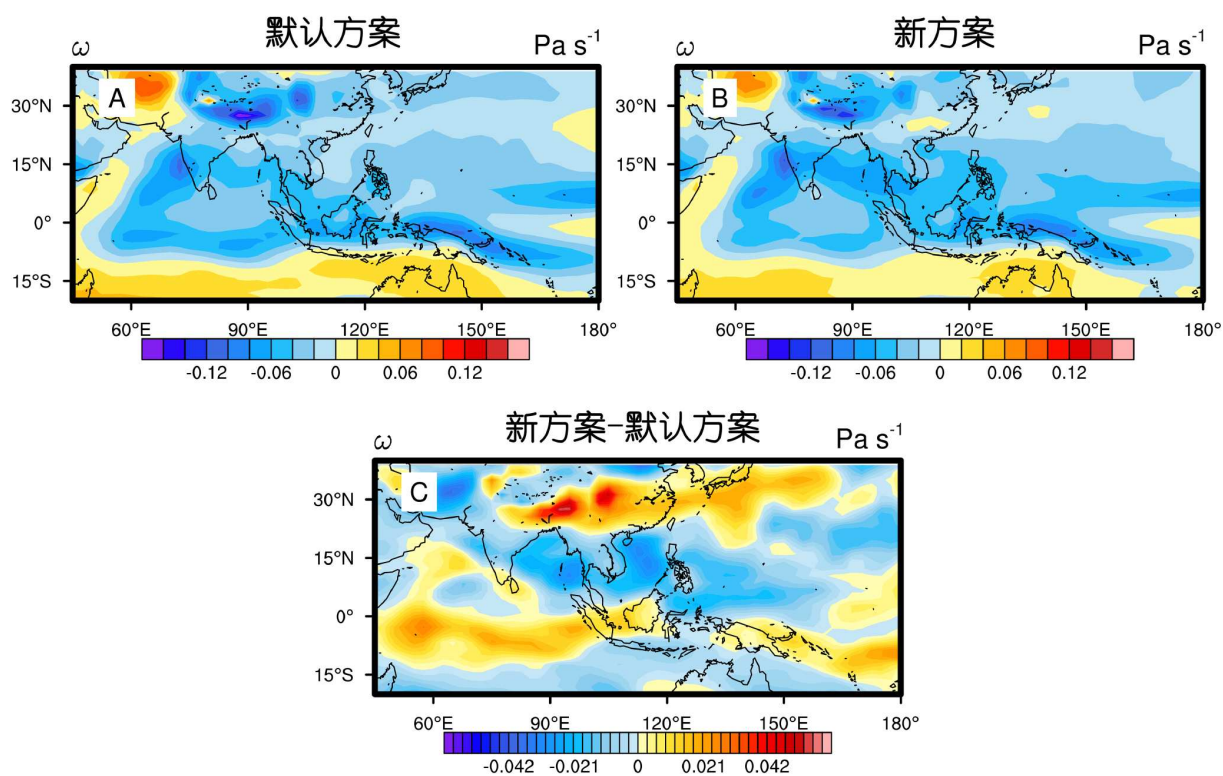


图8 默认方案(A)和新方案(B)模拟的6-9月平均的500 hPa垂直气压速度(ω , 单位: Pa s^{-1})的空间分布及其差异(C)

在南亚区域的水汽辐合增大(区域平均水汽通量散度从 $-0.03 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 减小到 $-0.08 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、上升运动增强,最终减小了默认方案模拟亚洲夏季风及相关区域降水的系统性偏差。

尽管本研究引入的冰晶谱离散度参数化方案一定程度上缓解了气候模式对亚洲季风区及相关区域降水的模拟偏差,但该系统性偏差依旧存在,表明模式假定冰晶粒子谱谱形参数为常数0的局限性是导致降水模拟出现偏差的一个因素,但并非唯一因素。另外,该参数化是Zou等(2022)利用中尺度天气预报模式结合谱分档微物理方案模拟中国安徽寿县的对流云建立的,基于单个个例的模拟结果可能无法充分反映亚洲夏季风及相关区域的冰晶粒子谱特征。因此,未来有必要基于更广泛区域的云微物理资料,发展更具普适性的冰晶谱离散度参数化,并进一步完善模式对其他物理过程的描述,降低气候模式对亚洲夏季风云及相关区域云降水模拟的不确定性。结果表明,本研究引入的新冰晶谱离散度参数化方案明显改进了对亚洲夏季风及相关区域的云降水特征模拟,也提升了对南、北半球季风区域的夏季风降水模拟,该方案对全球季风系统的影响需要进一步分析,这是未来值得继续研究的课题。

致谢 本论文的数值计算得到了南京信息工程大学高性能计算中心的计算支持和帮助。感谢ICDC、CEN、汉堡大学提供的数据支持。

补充材料 补充材料为作者提供的原始数据,作者对其学术质量和内容负责,详见网络版(<http://earthcn.scichina.com>)。

参考文献

- 贺欣, 陆春松, 史湘军, 等. 2023. 三参数冰相云微物理方案的构建及在单柱大气模式中应用. *科学通报*, 68: 1971–1984
- 贺欣, 陆春松, 史湘军, 等. 2024. 三参数冰相云微物理方案在CIESM模式中的应用. *科学通报*, 69: 2417–2428
- 李君俊, 陆春松, 陈景华, 等. 2025. 对流夹卷和地形拖曳对青藏高原降水影响的综合效应. *中国科学: 地球科学*, 55: 2728–2745
- 尹金方, 王东海, 翟国庆. 2014. 区域中尺度模式云微物理参数化方案特征及其在中国的适用性. *地球科学进展*, 29: 238–249
- Bluestein H. 1992. *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes: Volume I: Principles of Kinematics and Dynamics*. Oxford: Oxford University Press. 448
- Boo K O, Martin G, Sellar A, et al. 2011. Evaluating the East Asian monsoon simulation in climate models. *J Geophys Res*, 116: D01109
- Bush S J, Turner A G, Woolnough S J, et al. 2015. The effect of increased convective entrainment on Asian monsoon biases in the MetUM general circulation model. *Q J R Meteorol Soc*, 141: 311–326
- Chang E C, Yeh S W, Hong S Y, et al. 2013. Sensitivity of summer precipitation to tropical sea surface temperatures over East Asia in the GRIMs GMP. *Geophys Res Lett*, 40: 1824–1831
- Chansaengkrachang K, Luadsong A, Ascharyaphotha N. 2018. Vertically integrated moisture flux convergence over Southeast Asia and its relation to rainfall over Thailand. *Pertanika J Sci Technol*, 26: 235–246
- Cordeira J M, Ralph F M, Moore B J. 2013. The development and evolution of two atmospheric rivers in proximity to western North Pacific tropical cyclones in October 2010. *Mon Weather Rev*, 141: 4234–4255
- Cui D Y, Wang C H, Santisirisomboon J. 2019. Characteristics of extreme precipitation over eastern Asia and its possible connections with Asian summer monsoon activity. *Intl J Climatol*, 39: 711–723
- Dutta U, Hazra A, Chaudhari H S, et al. 2022. Understanding the role of cloud microphysical processes behind the Indian summer monsoon rainfall. *Theor Appl Climatol*, 150: 829–845
- Fowler L D, Randall D A. 1994. A global radiative-convective feedback. *Geophys Res Lett*, 21: 2035–2038
- Gettelman A, Morrison H, Santos S, et al. 2015. Advanced two-moment bulk microphysics for global models. Part II: Global model solutions and aerosol-cloud interactions. *J Clim*, 28: 1288–1307
- Hanf F S, Annamalai H. 2020. Systematic errors in South Asian monsoon precipitation: Process-based diagnostics and sensitivity to entrainment in NCAR models. *J Clim*, 33: 2817–2840
- Hazra A, Chaudhari H S, Saha S K, et al. 2017. Effect of cloud microphysics on Indian summer monsoon precipitating clouds: A coupled climate modeling study. *J Geophys Res-Atmos*, 122: 3786–3805
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc*, 146: 1999–2049
- Heymsfield A J. 2003. Properties of tropical and midlatitude ice cloud particle ensembles. Part II: Applications for mesoscale and climate models. *J Atmos Sci*, 60: 2592–2611
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon Weather Rev*, 132: 103–120
- Hsu P C, Li T, Murakami H, et al. 2013. Future change of the global monsoon revealed from 19 CMIP5 models. *J Geophys Res-Atmos*, 118: 1247–1260
- Hu P, Chen W, Chen S F, et al. 2020. Relationship between the South China Sea summer monsoon withdrawal and September–October rainfall over southern China. *Clim Dyn*, 54: 713–726
- Huffman G J, Adler R F, Morrissey M M, et al. 2001. Global precipitation at one-degree daily resolution from multisatellite observations. *J Hydrometeorol*, 2: 36–50
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J Geophys Res*, 113: D13103
- Li T, Wang Y H, Wang B, et al. 2022. Distinctive South and East Asian monsoon circulation responses to global warming. *Sci Bull*, 67: 762–770
- Li Z Q, Lau W K M, Ramanathan V, et al. 2016. Aerosol and monsoon climate interactions over Asia. *Rev Geophys*, 54: 866–929
- Lim J O J, Hong S Y. 2005. Effects of bulk ice microphysics on the simulated monsoonal precipitation over east Asia. *J Geophys Res*, 110: D24201
- Lin P C, Lu C S, He X, et al. 2025. Improvement of ice particle spectral relative dispersion parameterization in the BCC-AGCM model and its impact on global climate simulation. *J Adv Model Earth Syst*, 17: e2024MS004642
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D. 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J Clim Appl Meteor*, 22: 1065–1092
- Lin Y L, Huang X M, Liang Y S, et al. 2020. Community integrated earth system model (CIESM): Description and evaluation. *J Adv Model Earth Syst*, 12: e2019MS002036
- Liu J, Wang B, Ding Q H, et al. 2009. Centennial variations of the global monsoon precipitation in the last millennium: Results from ECHO-G

- model. *J Clim*, 22: 2356–2371
- Lu C S, Liu Y, Yum S S, et al. 2020. Reconciling contrasting relationships between relative dispersion and volume-mean radius of cloud droplet size distributions. *J Geophys Res-Atmos*, 125: e2019JD031868
- Ma Z S, Liu Q J, Zhao C F, et al. 2018. Application and evaluation of an explicit prognostic cloud-cover scheme in GRAPES global forecast system. *J Adv Model Earth Syst*, 10: 652–667
- Ma Z S, Milbrandt J A, Liu Q J, et al. 2021a. Sensitivity of snowfall forecast over North China to ice crystal deposition/sublimation parameterizations in the WSM6 cloud microphysics scheme. *Q J R Meteorol Soc*, 147: 3349–3372
- Ma Z S, Zhao C F, Gong J D, et al. 2021b. Spin-up characteristics with three types of initial fields and the restart effects on forecast accuracy in the GRAPES global forecast system. *Geosci Model Dev*, 14: 205–221
- Ma Z S, Liu Q J, Zhao C F, et al. 2022. Impacts of transition approach of water vapor-related microphysical processes on quantitative precipitation forecasting. *Atmosphere*, 13: 1133
- Martin G M, Johnson D W, Spice A. 1994. The measurement and parameterization of effective radius of droplets in warm stratocumulus clouds. *J Atmos Sci*, 51: 1823–1842
- Morrison H, Gettelman A. 2008. A new two-moment bulk stratiform cloud microphysics scheme in the community atmosphere model, version 3 (CAM3). Part I: Description and numerical tests. *J Clim*, 21: 3642–3659
- Morrison H, Milbrandt J A. 2015. Parameterization of cloud microphysics based on the prediction of bulk ice particle properties. Part I: Scheme description and idealized tests. *J Atmos Sci*, 72: 287–311
- Park S, Bretherton C S. 2009. The University of Washington shallow convection and moist turbulence schemes and their impact on climate simulations with the Community Atmosphere Model. *J Clim*, 22: 3449–3469
- Park S, Bretherton C S, Rasch P J. 2014. Integrating cloud processes in the Community Atmosphere Model, version 5. *J Clim*, 27: 6821–6856
- Pathak R, Sahany S, Mishra S K. 2021. Impact of stochastic entrainment in the NCAR CAM deep convection parameterization on the simulation of South Asian summer monsoon. *Clim Dyn*, 57: 3365–3384
- Qu X, Huang G. 2019. Global monsoon changes under the Paris agreement temperature goals in CESM1 (CAM5). *Adv Atmos Sci*, 36: 279–291
- Stephens G L, Vane D G, Boain R J, et al. 2002. The cloudSat mission and the A-train: A new dimension of space-based observations of clouds and precipitation. *Bull Amer Meteorol Soc*, 83: 1771–1790
- Sun F, Hall A, Qu X. 2011. On the relationship between low cloud variability and lower tropospheric stability in the Southeast Pacific. *Atmos Chem Phys*, 11: 9053–9065
- Tas E, Koren I, Altaratz O. 2012. On the sensitivity of droplet size relative dispersion to warm cumulus cloud evolution. *Geophys Res Lett*, 39: L13807
- Wang B, Fan Z. 1999. Choice of South Asian summer monsoon indices. *Bull Amer Meteorol Soc*, 80: 629–638
- Wang B, Ding Q. 2006. Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years. *Geophys Res Lett*, 33: L06711
- Wang M Q, Peng Y R, Liu Y, et al. 2020. Understanding cloud droplet spectral dispersion effect using empirical and semi-analytical parameterizations in NCAR CAM5.3. *Earth Space Sci*, 7: e2020EA001276
- Wang Y, Lu C S, Niu S J, et al. 2023. Diverse dispersion effects and parameterization of relative dispersion in urban fog in eastern China. *J Geophys Res-Atmos*, 128: e2022JD037514
- Wilcox L J, Liu Z, Samset B H, et al. 2020. Accelerated increases in global and Asian summer monsoon precipitation from future aerosol reductions. *Atmos Chem Phys*, 20: 11955–11977
- Xu X Q, Lu C S, Liu Y, et al. 2020. Effects of cloud liquid-phase microphysical processes in mixed-phase cumuli over the Tibetan Plateau. *J Geophys Res-Atmos*, 125: e2020JD033371
- Yang B, Zhang Y C, Qian Y, et al. 2015a. Calibration of a convective parameterization scheme in the WRF model and its impact on the simulation of East Asian summer monsoon precipitation. *Clim Dyn*, 44: 1661–1684
- Yang B, Zhang Y C, Qian Y, et al. 2015b. Parametric sensitivity analysis for the Asian summer monsoon precipitation simulation in the Beijing climate center AGCM, version 2.1. *J Clim*, 28: 5622–5644
- Zhang G J, McFarlane N A. 1995. Sensitivity of climate simulations to the parameterization of cumulus convection in the Canadian climate centre general circulation model. *Atmosphere-Ocean*, 33: 407–446
- Zhang W T, Shi X J, Lu C S. 2022. Impacts of the ice-particle size distribution shape parameter on climate simulations with the Community Atmosphere Model Version 6 (CAM6). *Geosci Model Dev*, 15: 7751–7766
- Zhou T J, Li Z X. 2002. Simulation of the East Asian summer monsoon using a variable resolution atmospheric GCM. *Clim Dyn*, 19: 167–180
- Zou Q Y, Zhu L, Lu C S, et al. 2022. Parameterizations of different hydrometeor spectral relative dispersion in the convective clouds. *Atmos Ocean Sci Lett*, 15: 100141

(责任编辑：周博闻)