

基于位涡环流理论的 CAS FGOALS-f3-L 对东亚夏季风年际变率第二模态模拟能力评估

李言蹊^{1,3} 何编^{1,3} 刘屹岷^{1,3} 生宸² 何欣雨^{1,3} 吴国雄^{1,3}

1 中国科学院大气物理研究所地球系统数值模拟与应用重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大气物理研究所大气科学与地球物理流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG), 北京 100029

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 东亚夏季风 (EASM) 年际变率的精确模拟对于目前气候系统模式来说仍然是一个挑战。在本研究中, 基于最近提出的位涡环流 (PVC) 理论, 我们发现观测中 EASM 的多变量经验正交函数 (MV-EOF) 第二模态与跨赤道 PVC (CEPVC) 和穿越对流层顶 PVC (CUPVC) MV-EOF 第一模态之间具有密切联系。结果表明, FGOALS-f3-L 未能再现 EASM 高度场及降水场的经向偶极子形态, 这与 CUPVC 的模拟偏差密切相关。进一步分析表明, 正确模拟与 CUPVC 变化相关的水汽通量的辐合和辐散是模式能够准确模拟 EASM 第二模态的关键的物理过程。结果还表明, 改进与南亚高压相关的对 CUPVC 模拟的改进可以提高 EASM 年际变率的模拟技巧。

关键词 东亚夏季风 位涡环流 评估 FGOALS-f3-L

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2503.25002

Evaluation of the Simulation Capability of CAS FGOALS-f3-L for the Second Mode of Interannual Variability of the East Asian Summer Monsoon Based on the Theory of Potential Vorticity Circulation

LI Yanxi^{1,3} HE Bian^{1,3} LIU Yimin^{1,3} SHENG Chen² HE Xinyu^{1,3} WU Guoxiong^{1,3}

1 Key Laboratory of Earth System Numerical Modeling and Application, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The precise simulation of interannual variability of East Asian summer monsoon (EASM) is still a challenge for the state-of-the-art models. In this study, based on the recent proposed potential vorticity circulation (PVC) theory, we find that the second mode of the multivariate empirical orthogonal function (MV-EOF) for the

收稿日期 2025-03-27 网络预出版日期

作者简介 李言蹊, 女, 1996 年出生, 博士研究生, 主要从事位涡动力学研究。E-mail: yxli@lasg.iap.ac.cn

通讯作者 何编, 男, 研究员, 主要从事气候动力学、气候数值模拟、大气模式研发、评估和应用研究。E-mail: heb@lasg.iap.ac.cn

基金项目 国家重点研发计划 2022YFF0802003, 国家自然科学基金 42475020

observed East Asian Summer Monsoon (EASM) has a close relationship with the first mode of the cross-equatorial PVC (CEPVC) and the cross-tropopause PVC (CUPVC). Based on observational analysis, we further evaluate the simulation capability of the second mode of the East Asian Summer Monsoon (EASM) in July from the FGOALS-f3-L historical experiment and analyze the potential causes of the bias. Results indicate that the model fails to reproduce the meridional dipole pattern of geopotential height and precipitation of EASM which is closely related to the simulation of the CUPVC bias. Further analysis suggests that the correct simulation of the convergence and divergence of the water vapor flux which related to the changes in CUPVC is the key physical process for the model to accurately simulate the second mode of EASM. The results also indicate the improvement in the simulation of the CUPVC related to the South Asian High (SAH) phenomenon could improve the simulation skill of the interannual variability of EASM.

Keywords East Asian summer monsoon, potential vorticity, simulation, FGOALS-f3-L

1 引言

东亚夏季风 (EASM) 是亚洲气候系统的一个重要的部分,能够对民众的生活产生至关重要的影响,例如 EASM 异常会诱发洪水或者干旱,对社会发展和民众的生命财产造成难以挽回的损失 (Huang et al., 2007; 周天军等, 2018)。因此,了解气候模式对 EASM 的模拟技能和相关偏差,提高 EASM 预测技巧,为社会和经济发展服务具有重要的现实意义。

EASM 年际变化第一种模态特征为:在 850hPa,从低纬西太平洋经日本海至鄂霍次克海呈现经向三极型异常环流结构,对应着长江流域、日本与华北、华南降水距平呈现反位相变化的三极型特征 (Hsu 和 Lin, 2007; 黄荣辉等., 2011; Huang 等., 2012)。本文主要关注 EASM 的第二模态,第二种模态的特征为:在 850hPa,中国东部受一气旋(反气旋)异常控制,对应着东亚季风区的降水距平呈现南涝北旱(南旱北涝)的偶极型结构 (Huang 等., 2011; Huang 等., 2012; Li 等., 2025)。该模态受多种因素影响,例如,大气内部动力过程 (He et al., 2017; Huang et al., 2012; Zhou et al., 2020)、海气相互作用 (Guo et al., 2014; Jiang et al., 2022; Wen et al., 2019; Zhang et al., 2024)、陆面过程 (Hu and Duan, 2015; Li et al., 2023) 和热带平流层作用 (Ju et al., 2023; Zhang et al., 2024); 它们可以通过影响经向扩展的异常西北太平洋反气旋与和中国东北局部的异常气旋使降雨正异常向东北延伸,形成了偶极型降雨异常 (Sun et al., 2021)。

中国科学院 (CAS) 的海-陆-气耦合模式 (FGOALS-f3-L) 由中国科学院大气物理研究所 (IAP) 大气科学与地球物理流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG) 开发 (包庆等, 2019; He et al., 2019, 2020; Li et al., 2019; 黄昕等, 2019; Zhou et al., 2015), 并参与了 CMIP6 科学试验 (Eyring et al., 2016)。FGOALS-f3-L 通过三极网格和 FV3 核心的创新设计,显著提升了高纬度海洋与大气过程的模拟能力,其成果被 CMIP6 多篇研究引用为技术范例 (He et al., 2019; Guo et al., 2020a, b)。尽管在深层海洋和极端降水模拟中仍存在局限,但其整体表现已跻身国际中上游水平,并为耦合模型发展提供了重要参考 (Zhou et al., 2018; Li et al., 2020; Liang et al., 2023)。历史试验是 CMIP6 中的核心试验,它基于观测外强迫数据,可以模拟 1850 年至 2014 年在外部强迫如温室气体、太阳辐射、气溶胶等历史变化的情况下,全球地表温度和降水等要素是如何变化的。FGOALS-f3-L 历史试验能够合理再现全球表面气温和降水的空间分布,成功捕捉了 1850 年以来的全球变暖趋势 (Guo et al., 2020a)。针对东亚暖季降水,系列研究指出多数模式模拟或预报的降水偏多 (Yang et al., 2022, 2023; Chen et

al., 2023; Rao et al., 2023a, b), FGOALS-f3-L 历史试验对东亚夏季降水的模拟也存在偏多的特征 (He et al., 2025)。

针对历史试验对东亚夏季风的模拟, Zhang et al. (2023) 指出, 该模式能够很好地再现 EASM MV-EOF 的第一模态, 在 200hPa, 副热带和中纬度呈现反位相异常环流结构, 对应着 850hPa 副热带高压增强, 长江流域、日本与与华北、华南降水距平呈现反位相变化的三极型特征。但对第二模态的模拟性能相对较低。因此, 理解 FGOALS-f3-L 模式对东亚夏季风年际变率第二模态模拟偏差的原因对进一步改进模式, 提高预测技巧有非常重要的参考价值。

边界位涡环流 (potential vorticity circulation, PVC) 分析能够包含大气外强迫及内部动力过程的多种信号, 利用边界 PVC 这一理论工具能够有效表达海气、陆气、平流层-对流层交换及大气内部动力等多种物理过程。例如, Liu 等 (2023) 表明青藏高原地表 PVC 异常可通过改变副热带西风急流、南亚高压以及西太副高的强度和位置, 进而影响梅雨锋降水; Li 等 (2025) 揭示了通过对流层 PVC 内部调整, 穿越赤道 PVC 和穿越对流层顶 PVC 的年际变率可以在 EASM 区域产生跷跷板型降水变率。边界 PVC 的概念由 Sheng et al. (2023) 提出, 利用高斯散度定理, 北半球的对流层总 PVS 由穿越赤道 PVC (CEPVC)、穿越下边界 PVC (CBPVC) 和穿越上边界 PVC (CUPVC) 确定。由于 CEPVC 和 CUPVC 的变化与 CBPVC 和对流层内部 PVS 的变化密切相关, 而后者与 EASM 的变化有关, 因此可以推测 CUPVC 和 CEPVC 对 EASM 能够产生重要影响。PVC 分析模式偏差对 EASM 的可能影响提供新的参考。

在本研究中, 我们试图揭示 FGOALS-f3-L 对 CEPVC 和 CUPVC 的模拟性能及其与 EASM 第二模态之间的联系。本文分为以下几个部分: 第二节为资料与方法; 第三节评估了 CEPVC 和 CUPVC 的模拟性能及其与 EASM 的可能联系; 最后一节给出了结论与讨论。

2 资料和方法

2.1 资料

本文使用 MERRA2 的月平均风场、温度场、位势高度场、比湿场再分析资料 (Rienecker et al., 2011), 水平分辨率为 $0.625^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (经度 $\times$ 纬度)。月平均降水自 GPCP (2.3 版) (Adler et al., 2017), 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。再分析资料均插值到 FGOALS-f3-L 历史实验的分辨率上。

本文使用 FGOALS-f3-L 月平均风场、温度场、位势高度场、比湿场的 r1i1p1f1 历史试验数据。该试验的强迫场严格遵循 CMIP6 历史试验标准, 涵盖温室气体、气溶胶、土地利用、太阳辐射和火山活动等主要人为与自然强迫因子 (Eyring et al., 2016)。拟评估 FGOALS-f3-L 的历史试验数据与再分析数据的偏差。

FGOALS-f3-L 历史试验数据水平分辨率为 $1^\circ \times 1.25^\circ$ (经度 $\times$ 纬度), 垂直层数 19 层。该试验数据垂直最高层次达到 1hPa, 能够表征完整的平流层过程。

MERRA2 数据的时间范围是 1980-2022 年, FGOALS-f3-L 历史实验的时间范围是 1850-2014 年。因此, 我们选取的所有数据集的研究时间为 1980-2014 年。

2.2 方法

2.2.1 MV-EOF、皮尔逊相关和 Lanczos 滤波

本文采用 MV-EOF 分析 CEPVC、CUPVC 与 EASM 的主要模态。具体步骤为: 首先, 去除数据的趋势与年代际变化; 其次, 对数据进行标准化处理; 第三, 对数据进行 MV-EOF 分解。皮尔逊相关和 T 检验被用来阐明 CEPVC、CUPVC 与 EASM 的关系。为关注年际变率, 对数据进行了去趋势和 9 年以下高通滤波处理。Lanczos 滤波器用于提取年际信号, 高通滤波用于过滤掉 9 年以上的变化, 权重为 11 年。

2.2.2 位涡环流 (potential vorticity circulation, PVC)

Sheng et al. (2022) 和吴国雄等 (2024) 提出了位涡环流 (PVC) 的概念, 作为一种新的理论工具, PVC 能够有效揭示大气内部动力学特征。在 p 坐标系中, PVC 可以写作如下形式:

$$\mathbf{J}_c = (J_c^x, J_c^y, J_c^p) = -\frac{\partial v}{\partial p} \theta \mathbf{i} + \frac{\partial u}{\partial p} \theta \mathbf{j} + (f + \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}) \theta \mathbf{k}, \quad (1)$$

其中, f 为科氏参数, 单位为 s^{-1} ; $(\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$ 在 p 坐标系中分别指向东、向北和向下。式 (1) 表明 PVC 取决于位温 (θ) 加权的水平风的水平与垂直切变, 与大气环流密切相关。

定义单位体积的位涡为 W , W 即为位涡物质 (PVS) (Haynes 和 McIntyre, 1987, 1990; Bretherton 和 Schär, 1993):

$$W = \frac{1}{\alpha} P = \zeta_a \cdot \nabla \theta = \nabla \cdot (\zeta_a \theta). \quad (2)$$

W 的局地变化 (Haynes 和 McIntyre, 1987; Ma 等., 2019) 可写作:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -\nabla \cdot (W \mathbf{V} - \zeta_a \dot{\theta} - \theta \nabla \times \mathbf{F}) = -\nabla \cdot (W \mathbf{V} - \zeta_a \dot{\theta} - \mathbf{F} \times \nabla \theta) = -\nabla \cdot \mathbf{J}, \quad (3)$$

其中, $\dot{\theta}$ 为非绝热加热 ($\dot{\theta} = d\theta/dt$), $\mathbf{F}$ 为摩擦力。 $\mathbf{J}$ 为“有效 PVS 通量” (Bretherton 和 Schär, 1993)

$$\mathbf{J} = W \mathbf{V} - \left(\zeta_a \dot{\theta} + \mathbf{F} \times \nabla \theta \right), \quad (4)$$

由方程 (2)、(3) 可得, PVC 的本质是有效位涡通量的时间积分:

$$\mathbf{J}_C = -(\zeta_a \theta) = \int \mathbf{J} dt + \nabla \times \mathbf{A}.$$

PVC 的散度与 W 密切相关, 当 PVC 辐合时, 存在 PVS, 反之亦然:

$$W = \zeta_a \cdot \nabla \theta = \nabla \cdot (\zeta_a \theta) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_C. \quad (6)$$

对方程 (6) 进行北半球对流层体积分, 并利用高斯定理 (Sheng et al., 2023):

$$\begin{aligned} \underbrace{\iiint_{NH} W dv}_{Gross} &= \underbrace{\iiint_{NH} -\nabla \cdot \mathbf{J}_C dx dy dp}_{\substack{CUF \\ CEF \\ CBF}} \\ &\approx \underbrace{\iint_{upper} -J_C^p \mathbf{k} \cdot (-\mathbf{k}) dx dy}_{CUF} + \underbrace{\oint_{eq} \int_{p_T}^{p_s} -J_C^y \mathbf{j} \cdot (-\mathbf{j}) dx dp}_{CEF} + \underbrace{\iint_{bot} -J_C^p \mathbf{k} \cdot (\mathbf{k}) dx dy}_{CBF} \\ &= \underbrace{\iint_{upper} J_C^p dx dy}_{CUF} + \underbrace{\oint_{eq} \int_{p_T}^{p_s} J_C^y dx dp}_{CEF} + \underbrace{\iint_{bot} -J_C^p dx dy}_{CBF}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中 p_s 和 p_T 分别表示地球表面和热力对流层顶。在方程 (7) 中, 方程左项为位涡物质体积分, 右边三项分别为 CUF (穿越对流层顶向下 PVC 面积分), CEF (穿越赤道向北 PVC 面积分), 和 CBF (穿越近地表向上 PVC 面积分)。穿越上边界 PVC (CUPVC) 被定义为穿越对流层顶的 J_C^p , 穿越赤道剖面 (CEPVC) 被定义为穿越赤道剖面的 J_C^y , 穿越下边界 PVC (CBPVC) 被定义为穿越近地表的 $-J_C^p$ 。边界位涡环流的优势在于, 它能够包含大气外强迫及内部动力过程的多种信号, 利用边界 PVC 这一理论工具能够有效表达海气、陆气、平流层-对流层交换及大气内部动力等多种物理过程。

3 结果

FGOALS-f3-L 历史试验可以基本再现东亚夏季风第一空间模态 (Zhang et al., 2023), 而对第二空间模态的模拟能力相对较弱。本研究主要衡量 10° - 50° N、 80° - 140° E 区域 200hPa 水平风、位势高度, 850hPa 水平风以及降水 MVEOF2 的模拟性能 (Li 等., 2025)。观测中东亚夏季风 MVEOF2 主要表现为东亚地区南北偶极子降水结构 (图 1b), 伴有低层 (850hPa) 中国东部和西北太平洋上空的反气旋异常结构, 高层 (200hPa) 自中南半岛至西北太平洋气旋性异常带, 华北东北为反气旋异常。历史试验对 MVEOF2 的模拟性能相对较低, 观测与模拟的

空间相关系数仅为 0.60。观测与模拟的均方根误差仅为 0.009，相较于 EOF 空间变异模式系数 ($\sim 10^{-2}$)，我们仍然可以明确指出这两组数据的 EOF 分解在空间特征和动力学特性方面存在显著差距。模式模拟的主要偏差为，高层反气旋异常并延伸至中亚，低层东亚大陆上的南风更强，模式无法再现观测中降水的经向模态，降水的正异常中心向东北移动。

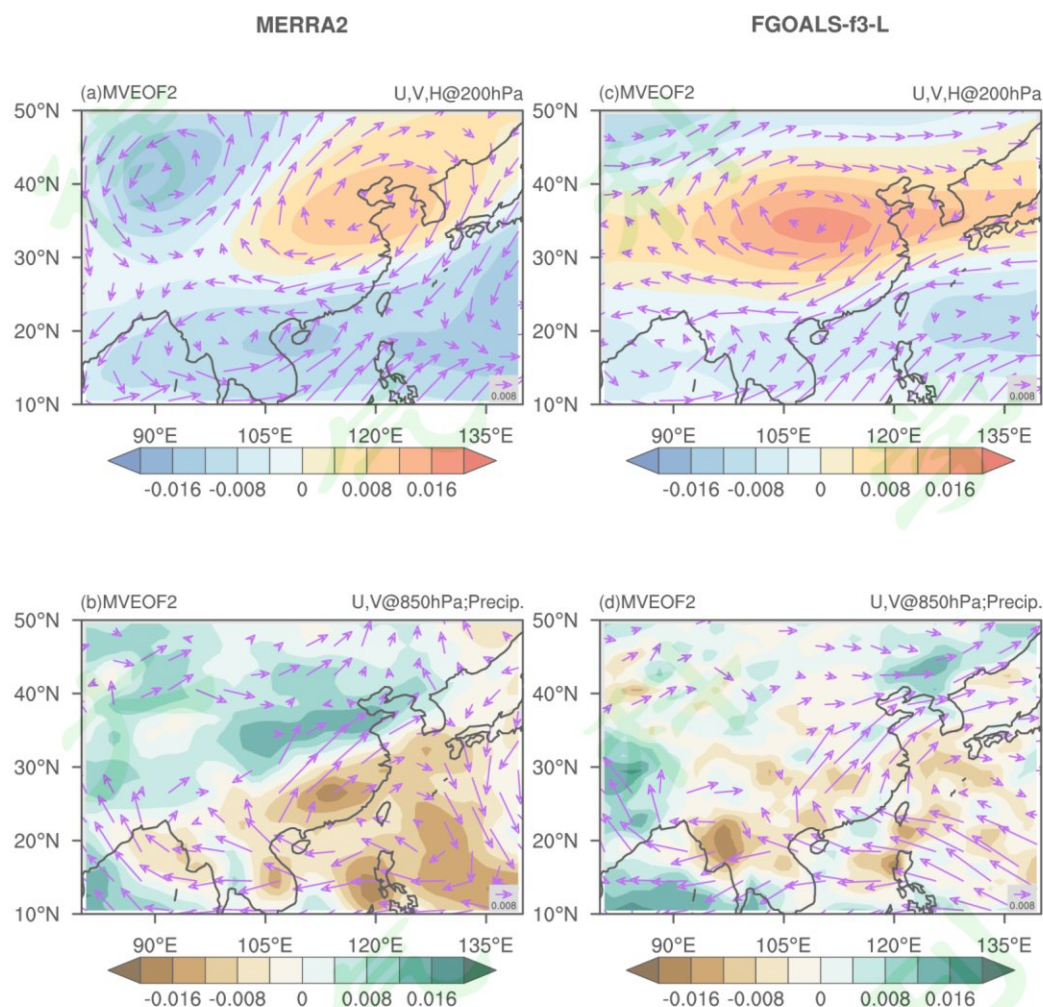


图 1 1980-2014 年 7 月 MERRA2 和 GPCP 资料的 (a) 200hPa 水平风和位势高度、(b) 850hPa 水平风、降水的 MVEOF2 的空间分布。(c, d) 同上，但为 FGOALS-f3-L 历史试验资料。
Fig. 1 Spatial pattern of the second MV-EOF modes of (a) 200 hPa horizontal winds and geopotential height, (b) 850 hPa horizontal winds and precipitation for the MERRA2 and GPCP data during the 1980- 2014 July mean. (c, d) Similar as above but for the FGOALS-f3-L historical experiment.

图 2a 计算了观测的位涡环流。在赤道太平洋上空，CEPVC 主要在对流层 (1000hPa~ 70hPa) 呈现垂直“正-负-正”模态；然而，在赤道大西洋和印度洋

上空，CEPVC 呈现垂直“负-正-负”模态。这种 CEPVC 垂直模态主要与纬向风垂直切变有关（Sheng et al., 2022）。FGOALS-f3-L 历史实验基本可以再现 CEPVC 的垂直结构（图 2d）。

对流层顶附近的欧亚大陆上空呈现三条带状的 CUPVC 分布：从赤道非洲经北印度洋到西太平洋的正位相带，从北非到中国东北的负位相带，以及中纬度的一条正位相带。观测到的 CUPVC 在东亚陆地上呈现跷跷板模态（图 2b），对应于跷跷板降水模态（图 1b）。对于模拟数据而言（图 2e），基本上可以再现中纬度地区 CUPVC 的带状结构，但略有北移。模拟的 CUPVC 在欧亚大陆上空显示出从 60°E 到 130°E 的更强的经向偶极子模态。CEPVC 和 CUPVC 的差异表明 PVC 的主要模拟偏差位于欧亚大陆的中低纬度区域。跷跷板 CUPVC 模态向北移动（图 2e），雨带随之向北移动（图 1d）。CEPVC 和 CUPVC MVEOF1 的标准化时间变化特征称为 PVC 指数（PVCi）。这些偏差可能导致东亚降水和环流的模拟偏差。

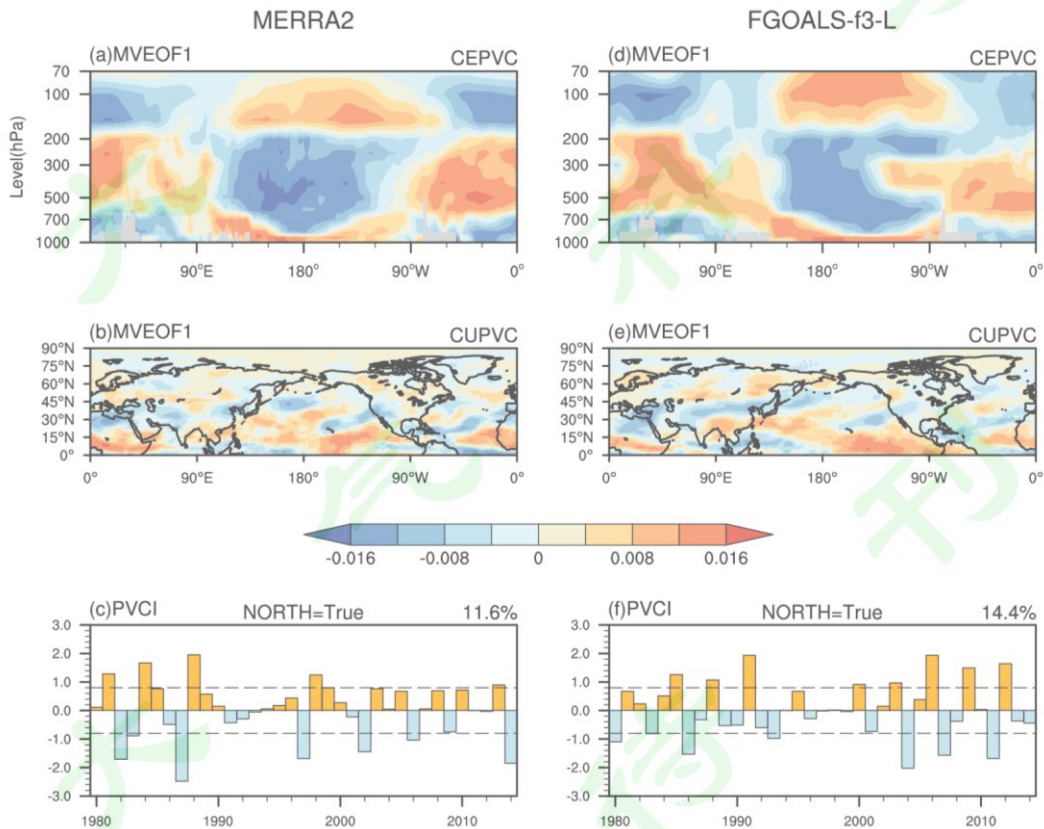


图 2 1980-2014 年 7 月 MERRA2 资料的 (a) 跨赤道 PVC (CEPVC) 和 (b) 穿越对流层顶 PVC (CUPVC) 的 MVEOF 的第一模态以及 (c) 它们相应的标准化 PC。(d, e, f) 同上，但为 FGOALS-f3-L 历史试验资料。

Fig. 2 Spatial pattern of the first MV-EOF modes of (a) CEPVC and (b) CUPVC for the MERRA2 data during the 1980- 2014 July mean. (d, e, f) Similar as above but for the FGOALS-f3-L historical experiment.

图 3 显示了观测和模式模拟的 PVICI 和 EASM 环流和降水之间的相关性分布。结果表明，在观测中，降水的相关性显示出清晰的经向偶极子模态，这与图 1b 中的 MV-EOF2 非常相似。850 hPa 环流相关性也显示出明显的西南风，与图 1b 中的环流类似。CUPVC 与 EASM 偶极子模态的形成高度相关，辽东半岛向上的 CUPVC 与 200hPa 位势高度正异常相对应，自中南半岛至西北太平洋向下的 CUPVC 与 200hPa 位势高度负异常相对应。然而，模式模拟无法再现 PVICI 与中国东部降水相关的偶极子模态（Fig. 3d）。与观测结果相比，华南地区的西南风也较弱，但东北地区西南风较强。在模式模拟结果中，经向偶极子模态和相关的西南风向东北移动，降水负异常移动至西北太平洋，降水正异常移动至东北地区，这表明该模式在模拟 PVICI 与 EASM 相关性时存在系统性偏差。

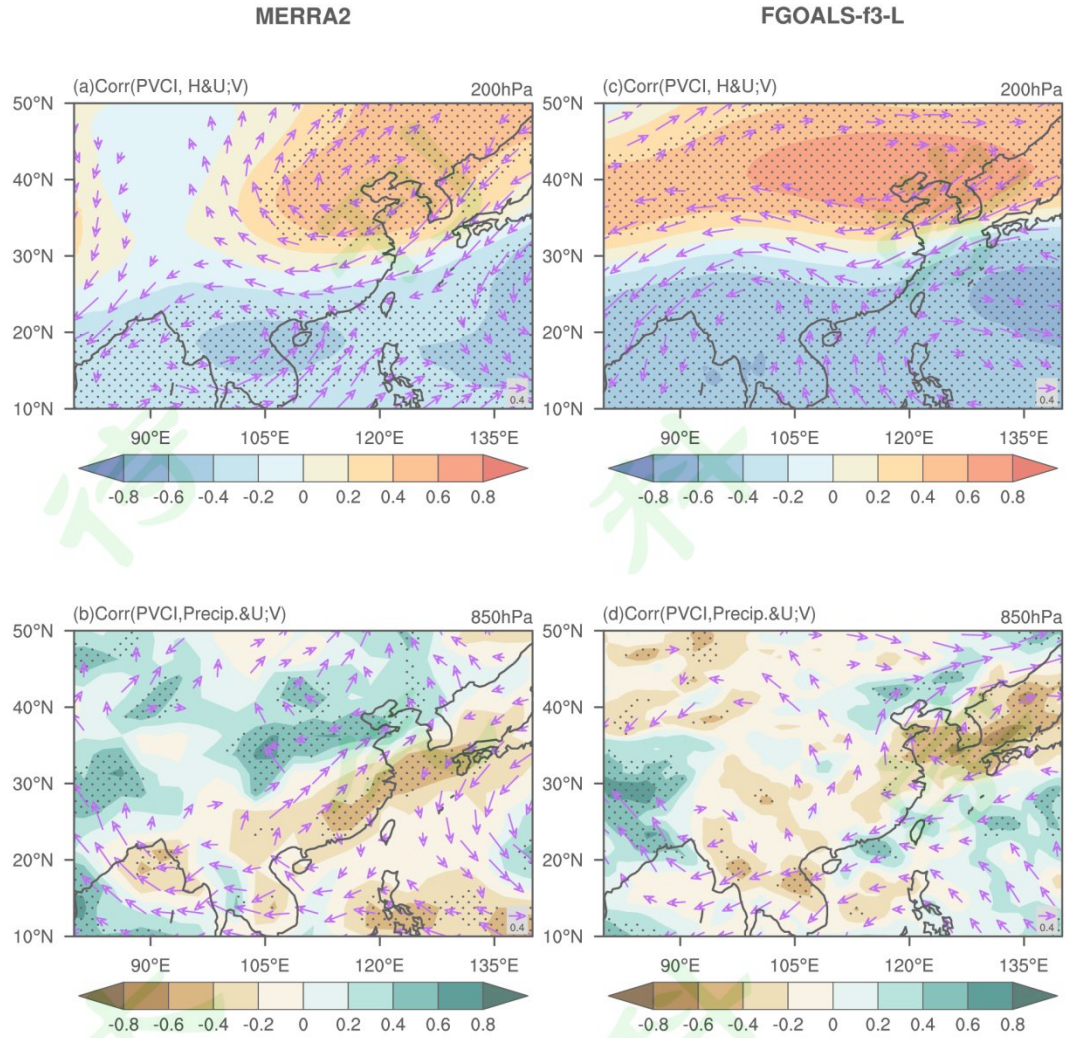


图 3 1980-2014 年 7 月 PPCI 与 (a) 200 hPa 水平风 (矢量) 和位势高度 (填色), (b) 850 hPa 水平风 (矢量) 和降水 (填色) 之间的相关系数空间分布。(c, d) 同上, 但为 FGOALS-f3-L 历史试验资料。打点和矢量均超过 0.1 显著性水平。

Fig. 3 Spatial distributions of correlation coefficients between PPCI and geopotential height (shading) and horizontal wind (vector) at 200 hPa (a), and between PPCI and horizontal wind at 850 hPa (vector) and precipitation (shading) (b) for the MERRA2 data during the 1980-2014 July mean. (c, d) Similar as above but for the FGOALS-f3-L historical experiment. Areas and vectors exceeding the 0.1 significance level are plotted.

为了将 CEPVC 和 CUPVC 与东亚的大气环流联系起来,再分析资料的 PPCI 与 PVS (填色) 和 PVC (矢量) 的相关性分布如图 4a-c 所示。从海洋性大陆到辽东半岛, PVC 和 PVS 在对流层高层与低层呈现反位相结构。在对流层上部, 华南地区和辽东半岛出现异常 PVC 辐合、辐散, 对应着异常的正 PVS、负 PVS, 华南地区出现向下 CUPVC 异常, 辽东半岛出现向上 CUPVC 异常, 与图 2b 相对应。而在对流层低层, 华南地区和辽东半岛出现异常 PVC 辐散、辐合, 对应

着异常的负 PVS 与正 PVS。

为了理解模式模拟的 PPCI 与东亚大气环流的内在联系及这种联系的模拟偏差，图 4d-f 呈现了模式模拟得到的 PPCI 与 PVS（填色）和 PVC（矢量）的相关性分布。显然，在上对流层，模式高估了与 PPCI 相关的偶极子模态强度。而在对流层低层，位涡环流的辐散一直延伸到我国东北地区（图 4e、f），对应负 PVS 异常。仅在 850hPa 辽东半岛上空的局部地区，存在弱 PVS 正异常。在辽东半岛，对流层高、低层大气呈现一致负位涡的准正压结构（图 3d、e），导致雨带北移。

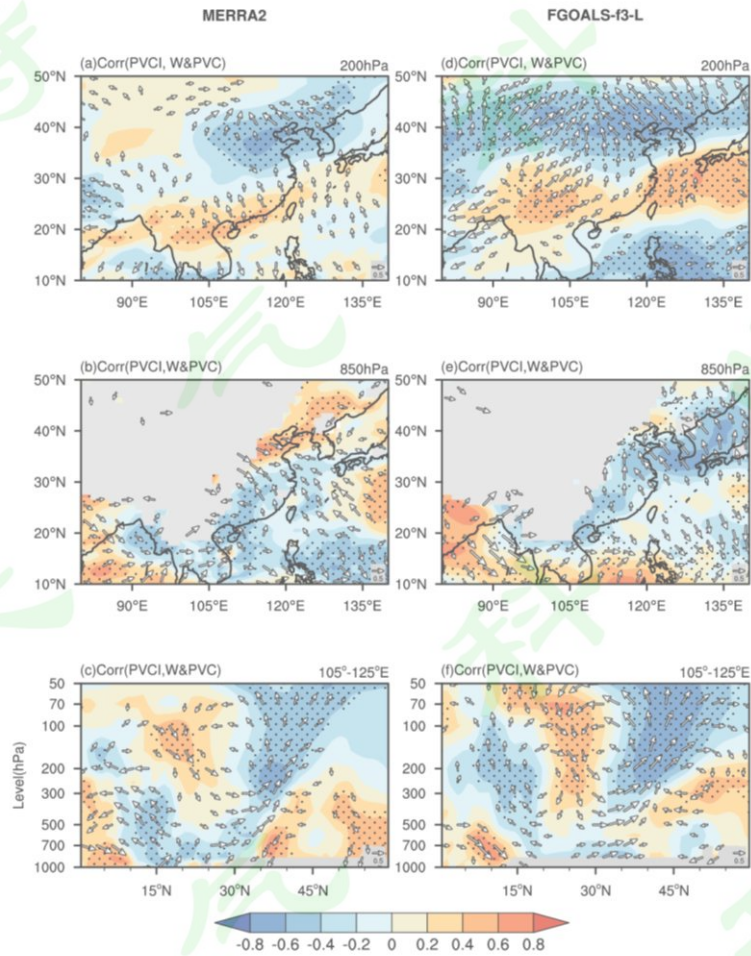


图 4 1980-2014 年 7 月 PPCI 与 (a) 200hPa、(b) 850hPa、(c) 105-125°E 平均经向剖面 PVC（矢量）和 PVS（填色）之间的相关系数空间分布。(d、e、f) 同上，但为 FGOALS-f3-L 历史试验资料。打点和矢量均超过 0.1 显著性水平。

Fig. 4 Distributions of correlation coefficients between PPCI and PVS (shading), as well as PVC (vector) at (a) 200hPa, (b) 850hPa, (c) 105-125°E mean cross-section during the 1980- 2014 July mean (d, e, f). Similar as above but for the FGOALS-f3-L historical experiment. Areas and vectors exceeding the 0.1 significance level are plotted.

PVC 和 PVS 的模拟偏差与季风发展所涉及的物理过程有关。我们分析了

PVCI 与温度平流、散度、水平与垂直环流、水汽通量及散度关系（图 5），以进一步了解 EASM 偏差的原因。在观测资料中温度平流和垂直运动的跷跷板结构的分界线大约在 34°N ，冷平流对应着对流层高层辐合、低层辐散以及下沉运动，暖平流对应着对流层低层辐合、高层辐散以及上升运动（图 5a、b）。然而，在 FGOALS-f3-L 历史试验中，温度平流和垂直运动的分界线在对流层下部接近 36°N 。且在华南低层辐散高层辐合，华北低层辐合高层辐散的结构无法在模式历史试验中捕捉到，仅在东北上空有微弱的低层辐合、高层辐散。在观测中，PVCI 与水汽通量其散度的关系，在华南辐散，华北、东北辐合，呈现明显的南北跷跷板结构，这种模态与图 1b、图 3b 非常相似，这意味着 PVC 对 EASM 的影响主要是通过影响低层的水汽通量及相关环流实现的。而就模式模拟的相关性而言，模式并未很好地捕捉到东亚大陆上的水汽通量及散度的跷跷板特征，水汽通量辐散区域移动至西北太平洋，而水汽通量辐合区位于东北地区。因此，模式无法很好地模拟影响 EASM 第二模态的相关物理过程。

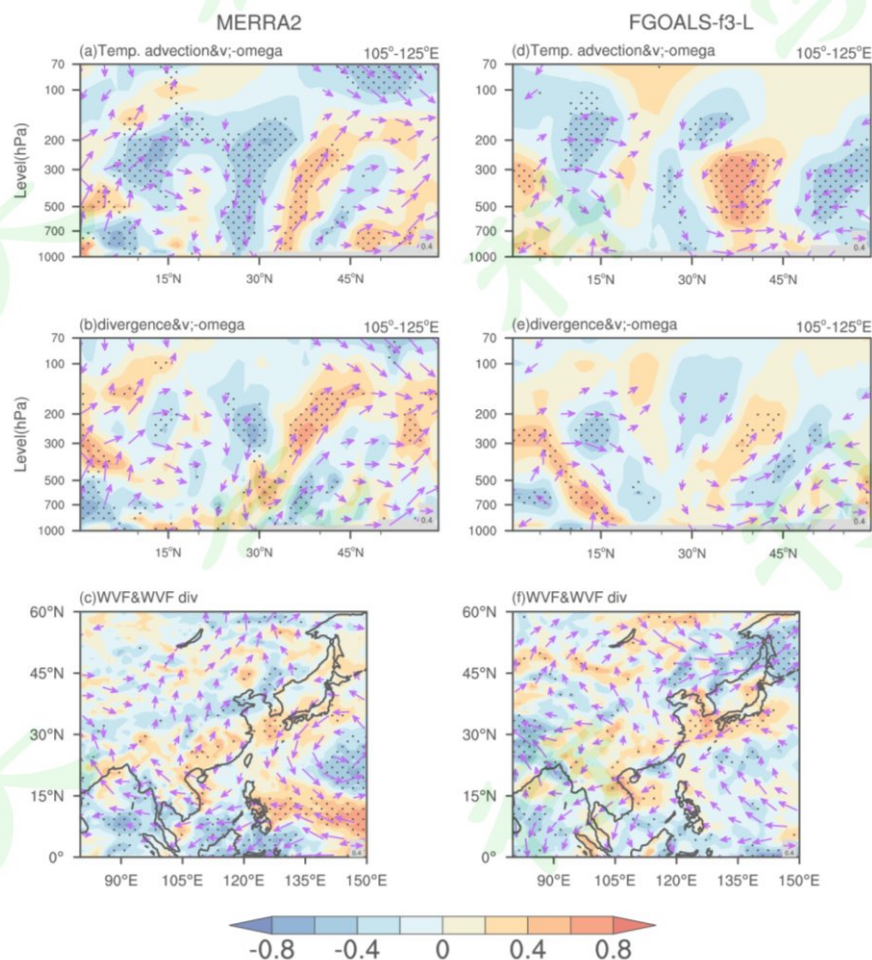


图 5 1980-2014 年 7 月 PVCI 与 105°E - 125°E 经向剖面 (a) 温度平流 (填色)、垂直环流 (矢

量)、(b) 散度 (填色) 垂直环流 (矢量); PPCI 与整层水汽通量 (填色) 及散度 (矢量) 的相关系数空间分布。(d、e、f) 同上, 但为 FGOALS-f3-L 历史试验资料。打点和矢量均超过 0.1 显著性水平。

Fig. 5 Meridional cross section averaged between 105°E and 125°E of distribution of correlation coefficient between PPCI and (a) temperature advection (shading) and circulation (vector), (b) divergence (shading) and circulation (vector). Distributions of correlation coefficients between integrated water vapor flux (vector) and its divergence (shading) (c) during the 1980- 2014 July mean. (d, e, f) Similar as above but for the FGOALS-f3-L historical experiment. Areas and vectors exceeding the 0.1 significance level are plotted.

为探讨造成东亚上空跷跷板 CUPVC 模式北移增强 (图 2b、e) 的原因, 我们分析了南亚高压的气候特征及其与 PPCI 的关系 (图 6)。从气候特征来看, 模式模拟的南亚高压较再分析资料得到的南亚高压强度上要低约 200gpm, 且大值中心较再分析资料略微偏北。当 PPCI 为正时, 南亚高压向北偏移, 由于模式得到的南亚高压强度更弱, 它的位置更容易发生南北偏移。当南亚高压在东北偏强, 华南偏弱时, 能够在东北产生向上的 PVC 辐散, 对应负 PVS, 在华南产生向下的 PVC 辐合, 对应正的 PVS, 模式的模拟结果高估了南亚高压与 PPCI 的关系, 且这种关系的空间分布大值区略有北移。

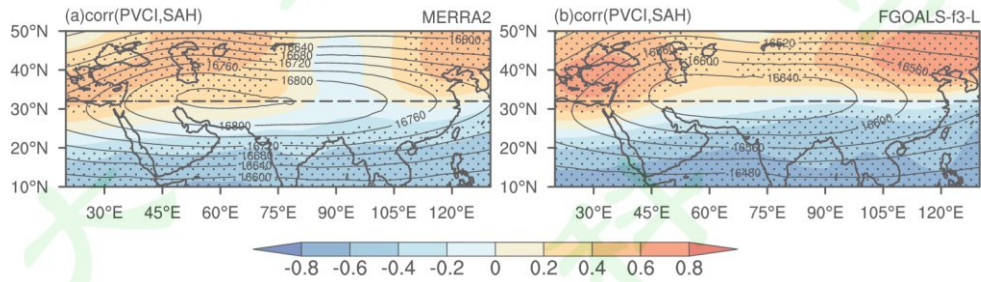


图 6 1980-2014 年 7 月 PPCI 与 (a) 100hPa 位势高度的相关系数 (填色) 空间分布; 100hPa 位势高度气候平均 (等值线, 单位: gpm)。(b) 同上, 但为 FGOALS-f3-L 历史试验资料。黑色虚线为 34° N 所在纬度。打点超过 0.1 显著性水平。

Fig.6 Distributions of correlation coefficients between PPCI and (a) geopotential height (shading) at 100 hPa during the 1980- 2014 July mean. geopotential height climatological mean at 100 hPa (contour, unit: gpm). (b) Similar as above but for the FGOALS-f3-L historical experiment. The black dotted line is the latitude of 34°N. Areas exceeding the 0.1 significance level are plotted.

4 结论与讨论

边界位涡环流概念由 Sheng 等 (2023) 提出, 通过监测边界位涡环流变化即可获得东亚夏季风的热动力信息 (Li 等., 2025)。本研究基于位涡环流的新理论, 评估了 FGOALS-f3-L 历史试验对东亚夏季风第二模态的模拟能力以及与北半球穿越赤道剖面及对流层顶位涡环流 MV-EOF1 模拟能力的关系。研究表明:

(1) FGOALS-f3-L 历史试验对七月东亚夏季风 MV-EOF2 的模拟性能相对较低。模式模拟的主要偏差为, 高层反气旋异常并延伸至中亚, 低层东亚大陆上

的南风更强，模式无法再现观测中降水的经向模态，降水的正异常中心模拟偏东北。

(2) 对北半球穿越赤道剖面及对流层顶位涡环流进行 MV-EOF 分析发现，FGOALS-f3-L 历史试验能够捕捉到穿越赤道剖面位涡环流第一模态的空间模态，而对穿越对流层顶位涡环流第一模态在欧亚大陆上空的捕捉能力较弱，对于重现位涡物质、位涡环流与位涡环流指数 (PVCi) 的关系存在一定偏差。在上对流层，模式高估了与 PVCi 相关的偶极子模态。而在对流层低层，位涡环流的辐散一直延伸到我国东北地区，对应负 PVS 异常。仅在 850hPa 辽东半岛上空的局部地区，存在弱 PVS 正异常。在辽东半岛，对流层高、低层大气呈现一致负位涡的准正压结构。与 PVCi 相关的水汽通量及散度对重现东亚大陆偶极子降水起着至关重要的作用，这是模式无法重现经向偶极子降水模态的主要原因。

(3) 模式模拟的东亚上空跷跷板 CUPVC 分布增强且偏北与对南亚高压的强度和位置的模拟偏差有密切联系。模式对南亚高压模拟能力偏弱使得其位置更容易发生南北偏移；南亚高压的大值中心略偏北使得东亚上空与 CUPVC 相关的 100hPa 位势高度跷跷板模态也略微偏北 (图 6)。

CEPVC 和 CUPVC 可以视为 EASM 的“监视器”，通过它可以反映各种外界环流系统 (包括但不限于南亚高压) 对 EASM 的影响。要改进 CUPVC 的模拟能力，可能需要首先改进南亚高压的模拟能力。此外，与 ENSO 冷位相对应，自对流层底向对流层顶，太平洋上空 (大西洋和印度洋上空)，CEPVC 由异常向北 (南) 向异常向南 (北) 再向异常向北 (南) 转变；ENSO 冷位相也与三极 CUPVC 结构有关，即从海洋大陆到中国东北部，CUPVC 有向上、向下再向上的异常 (Li et al., 2025)。热带海温作为大气主要强迫因子，其模拟能力对准确模拟边界 PVC 的分布及如何影响 EASM 的模拟还需要在今后的工作中进一步开展深入分析。

参考文献 (References)

- Adler R F, Gu G, Sapiiano M, et al. 2017. Global Precipitation: Means, Variations and Trends During the Satellite Era (1979–2014) [J]. *Surveys in Geophysics*, 38(4): 679-699. doi:10.1007/s10712-017-9416-4.
- 包庆, 吴小飞, 李矜霄, 等. 2018-2019 年秋冬季厄尔尼诺和印度洋偶极子的预测 [J]. *科学通报*, 2019, 64(1): 79-84. Bao Q, Wu X, Li J, et al. 2019. Outlook for El Niño and the Indian Ocean Dipole in autumn-winter 2018–2019 [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 64(1): 73-78. doi:10.1360/N972018-00913.
- Bretherton C S, Schär C. 1993. Flux of Potential Vorticity Substance: A Simple Derivation and a Uniqueness Property [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 50(12): 1834-1836.

doi:10.1175/1520-0469(1993)050<1834:FOPVSA>2.0.CO;2.

- Chen H, Rao J, Yang H, et al. 2023. Underrepresentation of the Linkage between the Barents–Kara Sea Ice and East Asian Rainfall in Early Summer by CMIP6 Models [J]. *Atmosphere*, 14(6): 1044. doi:10.3390/atmos14061044.
- Eyring V, Bony S, Meehl G A, et al. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization [J]. *Geoscientific Model Development*, 9(5): 1937-1958. doi:10.5194/gmd-9-1937-2016.
- Guo D, Gao Y, Bethke I, et al. 2014. Mechanism on how the spring Arctic sea ice impacts the East Asian summer monsoon [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 115(1-2): 107-119. doi:10.1007/s00704-013-0872-6.
- Guo Y, Yu Y, Lin P, et al. 2020a. Overview of the CMIP6 Historical Experiment Datasets with the Climate System Model CAS FGOALS-f3-L [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(10): 1057-1066. doi:10.1007/s00376-020-2004-4.
- Guo Y, Yu Y, Lin P, et al. 2020b. Simulation and Improvements of Oceanic Circulation and Sea Ice by the Coupled Climate System Model FGOALS-f3-L [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(10): 1133-1148. doi:10.1007/s00376-020-0006-x.
- Haynes P H, McIntyre M E. 1987. On the Evolution of Vorticity and Potential Vorticity in the Presence of Diabatic Heating and Frictional or Other Forces [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 44(5): 828-841. doi:10.1175/1520-0469(1987)044<0828:OTEOVA>2.0.CO;2.
- Haynes P H, McIntyre M E. 1990. On the Conservation and Impermeability Theorems for Potential Vorticity [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(16): 2021-2031. doi:10.1175/1520-0469(1990)047<2021:OTCAIT>2.0.CO;2.
- He B, Bao Q, Wang X, et al. 2019. CAS FGOALS-f3-L Model Datasets for CMIP6 Historical Atmospheric Model Intercomparison Project Simulation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 36(8): 771-778. doi:10.1007/s00376-019-9027-8.
- He B, Yu Y, Bao Q, et al. 2020. CAS FGOALS-f3-L model dataset descriptions for CMIP6 DECK experiments [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 13(6): 582-588. doi:10.1080/16742834.2020.1778419.
- He C, Lin A, Gu D, et al. 2017. Interannual variability of Eastern China Summer Rainfall: the origins of the meridional triple and dipole modes [J]. *Climate Dynamics*, 48(1-2): 683-696. doi:10.1007/s00382-016-3103-x.
- He X Y, He B, Bao Q, et al. 2025. The sensitivity of the Asian summer monsoon simulation to horizontal resolution and air–sea coupling in the FGOALS-f climate system model [J]. *Advances in Climate Change Research: S1674927825000322*. doi:10.1016/j.accre.2025.01.008.

- Hsu H, Lin S. 2007. Asymmetry of the Tripole Rainfall Pattern during the East Asian Summer [J]. *Journal of Climate*, 20(17): 4443-4458. doi:10.1175/JCLI4246.1.
- Hu J, Duan A. 2015. Relative contributions of the Tibetan Plateau thermal forcing and the Indian Ocean Sea surface temperature basin mode to the interannual variability of the East Asian summer monsoon [J]. *Climate Dynamics*, 45(9-10): 2697-2711. doi:10.1007/s00382-015-2503-7.
- Huang R, Chen J, Huang G. 2007. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24(6): 993-1023. doi:10.1007/s00376-007-0993-x.
- 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011: 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系. *大气科学*, 35(4): 589-606. HUANG Ronghui, CHEN Jilong, LIU Yong. 2011: Interdecadal Variation of the Leading Modes of Summertime Precipitation Anomalies over Eastern China and Its Association with Water Vapor Transport over East Asia. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 35(4): 589-606. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.04.01
- Huang R, Chen J, Wang L, et al. 2012. Characteristics, processes, and causes of the spatio-temporal variabilities of the East Asian monsoon system [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29(5): 910-942. doi:10.1007/s00376-012-2015-x.
- 黄昕, 周天军, 吴波, 等. 2019. 气候系统模式 FGOALS 模拟的南亚夏季风: 偏差和原因分析 [J]. *大气科学*, 43 (2): 437-455. Huang Xin, Zhou Tianjun, Wu Bo, et al. 2019. South Asian summer monsoon simulated by two versions of FGOALS climate system model: Model biases and mechanisms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 43 (2): 437-455, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.18131.
- Jiang J, Su T, Liu Y, et al. 2022. Southeast China Extreme Drought Event in August 2019: Context of Coupling of Midlatitude and Tropical Systems [J]. *Journal of Climate*, 35(22): 7299-7313. doi:10.1175/JCLI-D-22-0138.1.
- Ju Z, Rao J, Wang Y, et al. 2023. Modulation of the intraseasonal variability in early summer precipitation in eastern China by the Quasi-Biennial Oscillation and the Madden-Julian Oscillation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(23): 14903-14918. doi:10.5194/acp-23-14903-2023.
- Li J, Bao Q, Liu Y, et al. 2019. Evaluation of FAMIL2 in Simulating the Climatology and Seasonal-to-Interannual Variability of Tropical Cyclone Characteristics [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(4): 1117-1136. doi:10.1029/2018MS001506.
- Li L, Yu Y, Tang Y, et al. 2020. The Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model Grid-Point Version 3 (FGOALS-g3): Description and Evaluation [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12(9): e2019MS002012. doi:10.1029/2019MS002012.

- Li Y, Wu G, Liu Y, et al. 2025. Potential Vorticity Circulation across the Boundary of the Northern Troposphere and Its Link with East Asian Summer Monsoon in July [J]. *Journal of Climate*, 38(3): 781-795. doi:10.1175/JCLI-D-24-0286.1.
- Li Z, Yang Q, Yuan D, et al. 2023. Causes of a Typical Southern Flood and Northern Drought Event in 2015 over Eastern China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 40(11): 2092-2107. doi:10.1007/s00376-023-2342-0.
- Liang J, Meng C, Wang J, et al. 2023. Projections of mean and extreme precipitation over China and their resolution dependence in the HighResMIP experiments [J]. *Atmospheric Research*, 293: 106932. doi:10.1016/j.atmosres.2023.106932.
- Liu Y, Luan L, Wu G, et al. 2023. Impacts of the Surface Potential Vorticity Circulation over the Tibetan Plateau on the East Asian Monsoon in July [J]. *Atmosphere*, 14(6): 1038. doi:10.3390/atmos14061038.
- Ma T, Wu G, Liu Y, et al. 2019. Impact of Surface Potential Vorticity Density Forcing over the Tibetan Plateau on the South China Extreme Precipitation in January 2008. Part I: Data Analysis [J]. *Journal of Meteorological Research*, 33(3): 400-415. doi:10.1007/s13351-019-8604-1.
- Rao J, Garfinkel C I, Wu T, et al. 2023a. Combined Modes of the Northern Stratosphere, Tropical Oceans, and East Asian Spring Rainfall: A Novel Method to Improve Seasonal Forecasts of Precipitation [J]. *Geophysical Research Letters*, 50(1): e2022GL101360. doi:10.1029/2022GL101360.
- Rao J, Wu T, Garfinkel C I, et al. 2023b. Impact of the initial stratospheric polar vortex state on East Asian spring rainfall prediction in seasonal forecast models [J]. *Climate Dynamics*, 60(11-12): 4111-4131. doi:10.1007/s00382-022-06551-3.
- Rienecker M, Suarez M, Gelaro R, et al. 2011. MERRA: NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications [J]. *Journal of Climate*, 24(14): 3624-3648. doi:10.1175/JCLI-D-11-00015.1.
- Sheng C, Wu G, He B, et al. 2022. Linkage between cross-equatorial potential vorticity flux and surface air temperature over the mid-high latitudes of Eurasia during boreal spring [J]. *Climate Dynamics*, 59(11-12): 3247-3263. doi:10.1007/s00382-022-06259-4.
- Sheng C, Wu G, He B, et al. 2023. Aspects of potential vorticity circulation in the Northern Hemisphere: climatology and variation [J]. *Climate Dynamics*, 61(11-12): 5905-5913. doi:10.1007/s00382-023-06879-4.
- Sun L, Yang X Q, Tao L, et al. 2021. Changing Impact of ENSO Events on the Following Summer Rainfall in Eastern China since the 1950s [J]. *Journal of Climate*, 34(20): 8105-8123. doi:10.1175/JCLI-D-21-0018.1.
- Wen N, Liu Z, Li L. 2019. Direct ENSO impact on East Asian summer precipitation in the developing summer [J]. *Climate Dynamics*, 52(11): 6799-6815. doi:10.1007/s00382-018-4545-0.

- 吴国雄, 刘屹岷, 毛江玉, 等. 2024. 位涡源汇和位涡环流及其天气气候意义 [J]. 大气科学, 48(1): 8–25. Wu Guoxiong, Liu Yimin, Mao Jiangyu, et al. 2024. Potential Vorticity Source, Potential Vorticity Circulation, and Their Weather and Climate Significances [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 48(1): 8–25. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2306.23319.
- Yang H, Rao J, Chen H. 2022. Possible Lagged Impact of the Arctic Sea Ice in Barents–Kara Seas on June Precipitation in Eastern China [J]. Frontiers in Earth Science, 10: 886192. doi:10.3389/feart.2022.886192.
- Yang H, Rao J, Chen H, et al. 2023. Lagged Linkage between the Kara–Barents Sea Ice and Early Summer Rainfall in Eastern China in Chinese CMIP6 Models [J]. Remote Sensing, 15(8): 2111. doi:10.3390/rs15082111.
- Zhang R, Zhou W, Tian W, et al. 2024. A stratospheric precursor of East Asian summer droughts and floods [J]. Nature Communications, 15(1): 247. doi:10.1038/s41467-023-44445-y.
- Zhang X, He B, Bao Q, et al. 2023. Evaluation of the interannual variability in the East Asian summer monsoon in AMIP and historical experiments of CAS FGOALS-f3-L [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 16(1): 100275. doi:10.1016/j.aosl.2022.100275.
- Zhang X, He B, Bao Q, et al. 2024. The role of Arctic sea ice loss in the interdecadal trends of the East Asian summer monsoon in a warming climate [J]. npj Climate and Atmospheric Science, 7(1): 174. doi:10.1038/s41612-024-00717-y.
- Zhou B, Zhai P, Chen Y. 2020. Contribution of Changes in Synoptic-Scale Circulation Patterns to the Past Summer Precipitation Regime Shift in Eastern China [J]. Geophysical Research Letters, 47(12): e2020GL087728. doi:10.1029/2020GL087728.
- Zhou L, Bao Q, Liu Y, et al. 2015. Global energy and water balance: Characteristics from Finite-volume Atmospheric Model of the IAP/LASG (FAMIL 1) [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 7(1): 1–20. doi:10.1002/2014MS000349.
- 周天军, 吴波, 郭准, 等. 2018. 东亚夏季风变化机理的模拟和未来变化的预估: 成绩和问题、机遇和挑战 [J]. 大气科学, 42 (4): 902–934. Zhou Tianjun, Wu Bo, Guo Zhun, et al. 2018. A review of East Asian summer monsoon simulation and projection: Achievements and problems, opportunities and challenges [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (4): 902–934, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17306.
- Zhou T, Wang B, Yu Y, et al. 2018. The FGOALS climate system model as a modeling tool for supporting climate sciences: An overview [J]. Earth and Planetary Physics, 2(4): 276–291. doi:10.26464/epp2018026.