

CAS-ESM2.0 中植被水力方案的引入对中国夏季降水模拟的影响研究

林朝晖^{1,2}, 张汇玮^{1,2}, 魏楠³, 张贺^{1,4}, 陆星劫³, 吴成来¹, 戴永久³

- 1 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029
- 2 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049
- 3 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 中山大学大气科学学院, 珠海 519082
- 4 中国科学院大气物理研究所, 地球系统数值模拟科学中心, 北京 100029

摘要: 基于中国科学院自主研发的第二代地球系统模式 CAS-ESM2.0, 本研究通过在陆面分量模式 CoLM (Common Land Model) 中引入植被水力模型以替换原有的经验性方案, 开展了两组 34 年 (1981~2014 年) 的 AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) 数值模拟试验, 探讨了植被水力方案改进对中国夏季降水模拟的影响。结果表明, 植被水力模型的改进能够显著降低 CAS-ESM2.0 对中国夏季降水气候态的模拟偏差, 特别是显著改进了中国东部、青藏高原降水的低估, 青藏高原以东的川西地区降水高估的偏差, 同时也改善了夏季降水年际变率和极端大雨日数的模拟性能。进一步分析显示, 植被水力方案的改进显著减小了土壤湿度在长江流域偏干、青藏高原偏湿的模式模拟偏差, 降低了我国中东部以及青藏高原地表感热通量和潜热通量的模拟偏差, 改善了模式对陆气相互作用过程的模拟能力。陆气相互作用的改进显著提升了模式对东亚季风环流的模拟, 改进后的模式模拟的西北太平洋海平面气压的负偏差显著降低, 有利于西南季风以及西北太平洋向我国东部的水汽输送, 同时在对流层低层出现反气旋异常响应, 有效改善了中国东部南风偏弱及水汽辐合偏弱的模拟偏差, 使得我国东部降水负偏差显著减小。以上结果表明, 包括植被水力过程的陆气相互作用的合理表述是改善东亚夏季降水模拟的重要途径之一。

关键词: 植被水力参数化, 陆面过程模式, 夏季降水模拟, 地球系统模式

文章编号: 2025038A

doi: doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2504.25038

收稿日期 2025-03-07, **网络预出版日期:**

作者简介 林朝晖, 男, 1968 年出生, 博士, 研究员, 从事地球系统模式研制及短期气候与水文预测研究。

通讯作者 林朝晖, E-mail: lzh@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划 (2022YFE0195900)、国家自然科学基金项目 (42275173)、国家重大科技基础设施“地球系统数值模拟装置”、南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)资助项目 (SML2023SP216)

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2022YFE0195900), National Natural Science Foundation of China (Grants 42275173), National Key Scientific and Technological Infrastructure Project of China “Earth System Science Numerical Simulator Facility”, Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai) (No. SML2023SP216)

Introducing Plant Hydraulic Parameterization Scheme into CAS-ESM2.0 and Its Impact on Summer Precipitation Simulation over China

LIN Zhaohui^{1,2*}, ZHANG Huiwei^{1,2}, WEI Nan³, ZHANG He¹, LU Xingjie³, WU Chenglai¹, DAI Yongjiu³

1 *International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai, 519082*

4 *Earth System Numerical Simulation Science Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract Based on the second-generation Chinese Academy of Sciences Earth System Model (CAS-ESM2.0), this study firstly introduced a Plant Hydraulics Scheme (PHS) into the land surface component model, CoLM (Common Land Model), to replace the original empirical scheme. Two sets of 34-year (1981~2014) AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) numerical simulation experiments were then conducted to investigate the impacts of the improved PHS on the simulation of summer precipitation over China. The results demonstrate that the improvement of the plant hydraulics processes significantly reduces the climatological biases of summer precipitation in China by CAS-ESM2.0 model. Notably, it improves the underestimation of precipitation in eastern China and Tibetan Plateau, as well as the overestimation of precipitation in the western Sichuan region. Additionally, it enhances the simulation performance for interannual variability of summer precipitation and the frequency of extreme heavy rainfall days. Further analysis reveals that the improved PHS substantially reduce the model biases in soil moisture, specifically the overly dry bias over the Yangtze River Basin and the wet bias over the Tibetan Plateau. The modifications also reduce biases in simulating surface sensible flux and surface latent heat flux over the Yangtze River Basin, North China, and Tibetan Plateau, thereby improving the model's representation of land-atmosphere interactions. The improved land-atmosphere coupling significantly enhances the model's ability to simulate the East Asian monsoon circulation. Specifically, the improved model reduces the negative bias in simulated sea-level pressure over the northwestern Pacific, which favors the intensification of the southwest monsoon and moisture transport from the northwestern Pacific to eastern China. Concurrently, an anticyclonic circulation anomaly can be found in the lower troposphere, which effectively reduces the model biases in the underestimation of weak southerly winds and insufficient moisture convergence over eastern China, leading to a remarkable reduction in precipitation underestimation in eastern China. These findings underscore that an appropriate representation of land-atmosphere interactions, particularly incorporating plant hydraulic processes, is critical for improving simulations of East Asian summer precipitation.

Keywords Plant Hydraulic Parameterization, Land surface model, Summer precipitation simulation, Earth System Model

1 引言

地球气候系统模式作为研究气候变异机理以及预测预估的重要工具，其发展及应用一直是国内外气候科学研究的前沿和热点（曾庆存和林朝晖, 2010; 周天军等, 2020; Pan et al., 2025）。中国科学院地球系统模式（CAS-ESM）是由中国科学院大气物理研究所牵头，联合国内多家单位自主研发的地球气候系统模式。其首个版本 CAS-ESM1.0 于 2015 年发布，第二版 CAS-ESM2.0 于 2020 年定型并参加了第六次国际耦合模式比较计划（Coupled Model Intercomparison Project Phase 6, CMIP6），展示出对全球温度、降水等历史气候变化特征的良好模拟能力（Zhang et al., 2020）。国内外学者利用 CAS-ESM2.0 模式参与 CMIP6 试验的模拟

结果,分析评估了模式对降水的模拟性能,结果表明 CAS-ESM2.0 对全球降水的模拟能力在参与 CMIP6 比较计划的诸多模式中位居前列 (Li et al.,2022, Evans and Imran, 2024)。Evans and Imran (2024) 基于观测范围调整 (Observation range adjusted, ORA) 统计分析方法的研究结果表明, CAS-ESM2.0 对全球平均陆地降水的模拟偏差在 59 个模式中最小。Li et al. (2022) 利用综合评估指数 (Composite Rating Index, CRI) 评估了 44 个 CMIP6 模式对全球 29 个气候区域降水的整体模拟性能, CAS-ESM2.0 排名前五,但模式对东亚地区降水的模拟性能相对较低。由于受到复杂地形以及多尺度季风系统的影响,东亚夏季降水的准确模拟是现阶段气候模式模拟尚未完全解决的难题之一 (Chen et al., 2023; Xin et al., 2020; Yang et al., 2021; Zhang and Chen, 2016)。

已有研究结果表明,陆面过程以及陆气相互作用是影响东亚地区降水的关键过程 (林朝晖等, 2008; Chen, 2022), 包括土壤湿度、蒸散发在内的陆面状态变化能够通过影响局地环流以及海陆热力差异影响东亚季风降水 (Gao et al., 2019; Zhan and Lin, 2011)。因此在数值模式模拟中,陆面过程及其合理的参数化表述是影响东亚夏季降水模拟性能的重要因素 (邹靖和谢正辉, 2013; Geen et al., 2023; Shi et al., 2021)。CAS-ESM2.0 的陆面分量模式为国际上广泛应用的通用陆面模式 CoLM (Common Land Model)。CoLM 的发展结合了 BATS、IAP94 和 LSM 等国内外陆面过程模式优点 (Dai et al., 2003), 在 CAS-ESM2.0 框架下引入了植被冠层双大叶、土壤水、碳氮循环等多项关键过程参数化方案 (Ji et al., 2014; Zhang et al., 2020)。已有评估结果表明, CoLM 对陆面水循环、能量收支等方面的总体模拟总体效果良好 (彭静漫等, 2020; 田风云等, 2021; Li et al., 2017; Zhang et al., 2017)。随着陆面过程模式研发的不断深入,最新的 CoLM 离线版本 CoLM2024 在此基础上对多项物理过程方案进行了改进 (戴永久等, 2024)。其中陆面水循环过程的重要改进之一是植被水力模型 (Plant Hydraulics Schemes, PHS) 的引入, 改进了模式对植被蒸腾及地表蒸散发的模拟 (Li et al., 2021)。植被蒸腾作为地表蒸散发的主要组成部分, 不仅直接调控着局地至全球尺度的大气边界层通量 (Bonan et al., 2014), 还通过根系吸水与土壤水再分配间接影响植被生产力、碳汇稳定性及干旱事件的传递 (Koster et al., 2004)。

传统的陆面过程模式通过经验性土壤水分胁迫函数 (Soil Moisture Stress, SMS) 描述干旱条件下气孔导度的下降 (Lawrence et al., 2019)。这种方案虽然可以简化计算流程,但其理论基础存在根本缺陷。首先, SMS 仅基于根区平均土壤水势对蒸腾过程进行限制, 忽视了根系在垂直剖面的水力梯度以及水力重分配对于蒸腾过程的影响 (Kennedy et al., 2019)。例如, 干旱季节根系可将深层土壤水向浅层进行“水力提升”, 从而缓解浅层土壤的干旱程度, 这一现象在传统陆面过程模式中未能表征 (Li et al., 2021)。其次, 干旱引发的木质部导管栓塞会通过植物水力导度的非线性衰减减少水份流失, 传统陆面过程模式也未将这一过程纳入动态响应机制 (Choat et al., 2012)。此外, 不同植被功能型在气孔调节策略、根系形态及脆弱性曲线上的多样性被传统陆面过程模式过度抽象为统一参数 (Anderegg et al., 2018), 这造成了陆面模式在区域到全球尺度上对植被生理过程模拟的显著偏差。显然引入具有更加全面物理机制的植被水力模型不仅是技术优化的需求, 更是解决气候模式/陆面模式系统性偏差的科学必然。

植被水力模型 (Plant Hydraulics Schemes, PHS) 的建立始于土壤-植被-大气连续体 (SPAC) 概念的引入。该理论框架将植被视为水力网络, 基于达西定律建立从根系到叶片的水势梯度驱动的水流通量方程。Kennedy et al. (2019) 在美国大气研究中心陆面过程模式 CLM5 中首次实现 SPAC 的全耦合, 通过轴向导管模拟从叶片到根系的水分传输, 并通过径向导度关联根系与环境土壤的水势差。植被水力模型的创新体现在: (1) 基于脆弱性曲线量化木质部导度的干旱响应, 使气孔关闭与栓塞风险形成闭环; (2) 刻画多层根系水再分配: 通过基于多层根系水分输运的求解器, 允许水分的双向迁移 (例如雨季的“水力下移”和旱季的“水力提升”), 优化土壤水供给效率 (Li et al., 2021)。Li et al. (2021) 研究中利用 CoLM 离线试验结果, 验证了植被水力模型对稀树草原的蒸腾模拟偏差降低了 92.5%, 原因在于植被水力模型通过刻画深层根系对土壤水的提升作用改善了旱季土壤水分的利用。与此同时, 光合-蒸腾耦合关系的重参数化 (如引入叶片水势驱动的气孔导度方程) 使模拟的常绿针叶林的蒸腾与实测值的均方根误差降低了 174.5%。这些结果均表明了植被水力模型机理可以更准确的刻画植被对于不同水文条件的适应性, 从而有望改善陆面模式乃至气候模式对于不同地区的差异性气候特征的模拟效果。

为改善 CAS-ESM2.0 对东亚夏季降水的模拟能力,并理解植被水力过程的合理参数化方案对气候模式模拟东亚夏季降水性能的可能影响及其过程,本文在 CAS-ESM2.0 版本框架下,将植被水力模型引入到陆面过程模式分量 CoLM 中,并开展了两组植被水力方案改进前后的 AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) 数值模拟试验。通过两组试验结果的对比分析,探究植被水力方案改进对中国夏季降水模拟的影响及机制。

2 模式改进及试验设计

2.1 CAS-ESM2.0 模式简介

中国科学院地球系统模式 CAS-ESM 是由中国科学院大气物理研究所牵头,联合国内多家单位自主研发的地球气候系统模式。其首个版本 CAS-ESM1.0 于 2015 年发布,第二版 CAS-ESM2.0 于 2020 年定型。CAS-ESM2.0 包含如下 8 个分量模式:大气环流模式 IAP AGCM5.0、海洋环流模式 LICOM2、陆面过程模式 CoLM、海冰模式 CICE4、气溶胶和大气化学模式 IAP-AACM、植被动力学模式 IAP DGVM、海洋生物地球化学模式 IAP OBGCM 以及陆地生物地球化学模式 CoLM-BGCM。

CAS-ESM2.0 的大气环流分量模式 (IAP AGCM5.0) 是由中国科学院大气物理研究所自主研发的第 5 代大气环流模式 (Zhang et al., 2020)。该模式为基于有限差分的格点模式,采用随地形变化的垂直坐标系。模式垂直层次为 35 层,模式顶位于 2.2 hPa。模式的物理过程包括基于双烟流模式的对流参数化方案及新的云宏观物理参数化方案 (Xie and Zhang, 2015),考虑云滴谱离散度的云微物理参数化方案 (Morrison and Gettelman, 2008; Xie et al., 2018),大气边界层参数化方案 (Bretherton and Park, 2009),RRTMG 辐射方案 (Iacono et al., 2008),三模态气溶胶方案 (Liu et al., 2012),以及考虑各项异性的地形重力波参数化方案 (Xie et al., 2021)。

CAS-ESM2.0 陆面模式分量模式 CoLM 为中山大学、北京师范大学和中国科学院大气物理研究所共同研发的 CoLM2014 版本 (Dai et al., 2003; Ji et al., 2014; Zhang et al., 2020)。该版本土壤垂直层次为 15 层,最深可达 42.1m 且最大可提供 5 层雪层。CoLM2014 采用双大叶模型计算叶片温度、CO₂ 以及水汽通量,其光合作用-气孔导度模型对叶片阳面和阴面进行了分别考虑 (Dai et al., 2004)。在冠层辐射传输方面,采用了改进的二流近似方案 (Dai et al., 2003)。在冻土方案中,采用冰点抑制方程考虑过冷土壤水 (Niu and Yang, 2006)。地表及地下水运动采用了基于 TOPMODEL 概念的 SIMTOP 产流参数化方案 (Niu et al., 2007)。CoLM2014 中的植被水力方案采用经验性土壤水分胁迫函数,并未考虑植被根系水力梯度及水力重分配对土壤湿度及蒸散发的影响 (Li et al., 2021)。

2.2 植被水力方案的改进

鉴于植被水力过程对陆气相互作用的重要影响,本文通过在陆面分量模式 CoLM2014 中引入植被水力模型 (Plant Hydraulics Schemes, PHS),改进了 CAS-ESM2.0 对植被水力过程的描述。本节主要介绍 CoLM 陆面过程中植被水力方案的改进。

CoLM 植被水力模型根据土壤-植物-大气连续体的概念计算陆气水分交换的蒸腾分量。植被水力模型中的植物水分传输得益于土壤、根、茎和叶之间形成的水势梯度。植物各部位的水势也密切影响着各植物水力过程。首先,根、茎、叶的水势通过植物栓塞过程影响着植物水分传输能力;其次,植物根与每层土壤的水势梯度将影响根的水力重分配过程;最后,叶片的水势降低将影响叶片气孔导度,同时影响植物水分传输和光合作用。其中植物水势动态变化和植被水力导度衰减是植被水力方案中最为重要的两个过程。详细参数化方案数学及物理表达可参见最新版本 CoLM2024 的手册说明 (戴永久等, 2024; <https://github.com/CoLM-SYSU/CoLM-doc> [2025-03-07])。

植物水势的动态模拟是 CoLM 植被水力模型的关键。CoLM 植被水力模型的水势模拟包括地上和地下植物水力过程两部分。地上部分包括在阳叶、阴叶、茎和地表根四个节点的水势模拟,地下部分包括地表

根以及 10 层地下根共 11 个节点的水势模拟，地上、地下两部分通过地表根水势的模拟被密切耦合。CoLM 植物水势的动态模拟基于植物水分传输为稳恒流的假设，即水分传输速率正比于水势差和水力导度。由此，地上部分四个节点的水势均可由 Darcy 定律表达。以茎叶水分传输速率 $q_{leaf \leftarrow stem}$ 为例，其表达为

$$q_{leaf \leftarrow stem} = k_{leaf \leftarrow stem}(\Psi_{leaf} - \Psi_{stem}) \quad (1)$$

其中 $k_{leaf \leftarrow stem}$ 代表茎到叶的水力导度， Ψ_{leaf} 和 Ψ_{stem} 分别代表叶片和茎的水势。水分传输速率在各节点由于稳恒流假设，满足水分守恒方程 $E_{leaf} = q_{leaf \leftarrow stem}$ ，其中 E_{leaf} 代表植被蒸腾速率，由无水分胁迫情况下的叶片蒸腾速率和受叶片水势控制的蒸腾衰减函数所决定。因此，将上述稳恒流假设下的水分传输速率与叶片蒸腾速率联立求解，即可解出各节点水势。在此过程中，计算蒸腾速率所用到的最大气孔导度则需要植物水力模式、光合作用模式、气孔导度模式耦合解出。

地表根水势是关于每层土壤水势及根总吸水速率的函数，由地下植物水力过程计算。植物地下水力过程的关键过程是水力重分配，它描述了水分通过地下根系从湿润土壤层向干燥土壤层的传输，被认为是一个被动的受水势梯度所驱动的水分传输过程。基于该物理原理，Amenu 水力重分配模型被 CoLM 采用 (Zhu et al., 2017)，并与土壤水文过程和植被地上水力过程相耦合 (Li et al., 2021)。地下植物水力过程可以被简化地表示为

$$\Psi_{root,0} = R(\Psi_{soil,i}, q_{root,0}) \quad (2)$$

其输入包括土壤水势垂直分布 ($\Psi_{soil,i}$) 和根总吸水速率 ($q_{root,0}$)，输出包括地表根水势 $\Psi_{root,0}$ 、根水势垂直分布 ($\Psi_{r,i}$) 和根吸水速率垂直分布 ($q_{rad,i}$)。

植物水势下降导致的空穴现象会严重降低水分在植物内部的传导能力，造成植物水力导度的衰减。植被水力模型将实验上观测到水力导度随水势变化的 S 型脆弱性曲线引入到模型，对植物水力栓塞进行参数化，得到节点间的水力导度 $k_{i \leftarrow j}$ (从节点 j 到 i 的传输)：

$$k_{i \leftarrow j} = k_{max} \cdot 2^{-\left(\frac{\Psi_j}{p50}\right)^{c_k}} \quad (3)$$

其中 k_{max} 表示最大水力导度 (s^{-1})。 Ψ_j 代表节点 j 的水势 (mmH₂O)， $p50$ 代表水力导度降低 50% 时的水势 (mmH₂O)， c_k 代表脆弱性曲线的形状参数。实验数据发现气孔导度和叶片水势同样存在 S 型曲线关系，CoLM 植物水力模式引入蒸腾速率随叶片水势 ($\Psi_{sunleaf}$, $\Psi_{shaleaf}$) 的衰减函数：

$$E_{sun} = E_{sun,max} \cdot 2^{-\left(\frac{\Psi_{sunleaf}}{p50}\right)^{c_k}} \quad (4)$$

$$E_{sha} = E_{sha,max} \cdot 2^{-\left(\frac{\Psi_{shaleaf}}{p50}\right)^{c_k}} \quad (5)$$

$\Psi_{sunleaf}$ 和 $\Psi_{shaleaf}$ 分别表示阳叶水势和阴叶水势， $E_{sun,max}$ 和 $E_{sha,max}$ 分别表示无水分胁迫情况下的阳叶、阴叶的最大蒸腾速率。

2.3 试验设计及验证资料

为了考察植被水力方案的改进对中国夏季降水模拟的影响，本文基于 CAS-ESM2.0 陆气耦合分量模式（IAP AGCM5.0+CoLM2014）设计了两组 AMIP 数值模拟试验（见表 1）。两组试验的水平分辨率均为 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ ，采用 1981~2014 年的逐月观测海表温度和海冰密集度驱动陆气耦合模式模拟积分，温室气体及气溶胶排放同样采用观测数据。两组试验仅植被水力方案存在差异：第一组试验（Ctrl）为控制试验，植被水力方案为模式缺省的简单经验方案；第二组试验（hydroPHS）则采用改进后的植被水力参数化方案，在 CoLM2014 中引入了新的植被水力模型（PHS）。通过 hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟差异，可以进一步探究植被水力方案改进对 CAS-ESM2.0 模拟中国夏季降水的影响。

表 1 本文两组 AMIP 试验设置

Table 1 Configuration of the two AMIP experiments in this study

试验名称	大气模式	陆面模式	分辨率	积分时段	是否引入 PHS
Ctrl	IAP AGCM5	CoLM2014	$1.0^\circ \times 1.0^\circ$	1981~2014	否
hydroPHS	IAP AGCM5	CoLM2014	$1.0^\circ \times 1.0^\circ$	1981~2014	是

此外，本文在模拟结果比较和评估中用到了观测及再分析数据，其中包括：（1）中国区域格点化观测数据 CN05.1（吴佳和高学杰, 2013; Wu et al., 2017）的月平均以及逐日降水量资料，分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ；（2）土壤湿度以及地表变量验算采用 ERA5-Land 陆面再分析数据（Muñoz-Sabater et al., 2021）的月平均表层（0~7cm）和次表层（7~28cm）土壤湿度、地表感热通量和潜热通量数据，分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ ；（3）大气环流特征分析则使用 ERA5 大气再分析资料（Hersbach et al., 2020），分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。本文主要关注模式模拟期间（1981-2014 年）多年平均夏季（6-8 月）的模拟情况，季节平均结果均由月平均资料及日资料计算得出，在分析比较过程中采用双线性插值方法将观测及再分析资料插值到 $1.0^\circ \times 1.0^\circ$ 的模式网格上。

3 中国夏季降水模拟评估

图 1 给出了 1981~2014 年中国夏季平均降水观测值及模式模拟结果的比较情况。观测资料（图 1a）显示，中国夏季降水的气候态主要呈现由东南向西北递减的空间分布特征，大值中心出现在长江中下游流域、华南沿海及四川盆地，平均降水强度可达 7 mm d^{-1} 。Ctrl 模拟试验结果能够再现中国南多北少的降水空间分布特征，但是在中国东部、四川及青藏高原区域偏差较大，其中 Ctrl 试验中青藏高原以东的川西区域出现虚假的降水大值中心，幅值超过 7 mm d^{-1} ；模式虽然能够模拟出长江中下游以及东北地区的相对大值分布，但是幅值总体偏低，在 $3 \sim 5 \text{ mm d}^{-1}$ 之间（图 1b）。其中，高原以东的川西区域降水气候态相比观测显著偏高 3 mm d^{-1} ，青藏高原区域降水模拟相对偏少 $0.5 \sim 2.0 \text{ mm d}^{-1}$ ；而中国东部降水相比观测显著偏少，主要负偏差分布在华南至黄淮地区以及东北地区，负偏差幅值在 $1 \sim 3 \text{ mm d}^{-1}$ （图 1c）。

图 1d 给出了 hydroPHS 试验相比于 Ctrl 试验的模拟差异。结果表明，植被水力方案改进后，模式在高原以东的四川、甘肃和青海区域降水减少 $0.5 \sim 1.5 \text{ mm d}^{-1}$ ，高原大部区域降水增多 1.5 mm d^{-1} ，显著降低了高原以东区域降水模拟的正偏差；中国东部降水整体增多 $0.2 \sim 1.5 \text{ mm d}^{-1}$ ，其中长江以南地区降水增多 0.5

mm d⁻¹, 江淮至渤海湾地区显著增多 1 mm d⁻¹, 东北地区南部也呈现降水模拟正响应信号, 减小了 Ctrl 试验在中国东部的降水模拟负偏差。说明植被水力方案的改进能够显著降低模式对中国夏季降水气候态的模拟偏差。

图 1 1981~2014 年中国夏季平均降水 (单位: mm d⁻¹) 空间分布: (a) 观测; (b) Ctrl 试验; (c) Ctrl 试验与观测的模拟偏差 (Ctrl 减 CN05.1); (d) hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟差异 (hydroPHS 减 Ctrl)。图中打点的区域表示通过 95% 显著性检验。

Fig. 1 Spatial distributions of summer mean precipitation (units: mm d⁻¹) over China during 1981–2014: (a) Observations; (b) Ctrl; (c) Ctrl simulation biases compared to observations (Ctrl minus CN05.1); (d) differences between hydroPHS and Ctrl (hydroPHS minus Ctrl). Dotted areas denote the values significant at a confidence level of 95%.

图 2 为中国夏季降水年际变率观测及模拟结果的对比情况。图 2a 为观测降水年际变率空间分布, 与降水气候态分布相吻合, 中国夏季降水年际变率呈现东南向西北递减的分布特征, 长江中下游至江淮地区以及华南地区出现相对大值中心, 幅值可达 2.0mm d⁻¹ 以上, 西部地区降水年际变率较低, 幅值在 0.2~0.6mm d⁻¹。Ctrl 试验中降水年际变率整体呈现东高西低的分布特征, 江淮、华南以及高原东侧出现相对大值区域, 幅值在 1.0~1.5mm d⁻¹ (图 2b)。Ctrl 试验相比观测的降水年际变率模拟偏差如图 2c 所示: 高原以及河套地区相比观测存在显著正偏差, 降水年际变率模拟偏高 0.2~1.0 mm d⁻¹; 华南至长江中下游地区存在显著负偏差, 幅值在 0.5~1.0mm d⁻¹ 之间, 降水年际变化模拟偏弱。

图 2 同图 1, 但为夏季降水年际变率 (单位: mm d⁻¹)

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for summer precipitation interannual variability (units: mm d⁻¹).

图 2d 给出了 hydroPHS 试验相比于 Ctrl 试验的降水年际变率模拟差异。结果显示: 植被水力方案改进后, hydroPHS 试验在长江中下游以南以及华中地区降水年际变率升高 0.3~0.5mm d⁻¹, 减小了 Ctrl 试验在江南以及华中地区的年际变率负偏差; 青藏高原、四川西部以及河套地区降水年际变率显著降低 0.3mm d⁻¹, 减小了 Ctrl 试验在高原及河套地区的降水年际变率正偏差。以上结果表明, 植被水力参数化方案的改进能够显著降低 CAS-ESM2.0 对中国夏季降水气候态以及年际变率的模拟偏差。

此外, 本文针对夏季极端大雨日数 (日降水量 ≥ 20mm 的日数) 模拟情况进行了进一步评估, 以考察植被水力方案改进对夏季极端降水模拟的影响。图 3a 显示, 中国夏季极端大雨日数观测高值区主要分布在我国东部 40°N 以南地区, 幅值主要在 5~10 天之间, 大值中心位于长江中下游及华南地区, 平均可达 10 日以上。Ctrl 试验中, 高原以东的川西、青海和甘肃区域存在大雨日数高值中心, 幅值在 10 天以上; 模式虽然能够模拟出长江中下游以及云南、广西等地相对大值分布, 但是 105° E 以东范围内的主要高值区域位于华北至东北地区, 幅值在 3~5 天, 未能模拟出南多北少的空间分布特征 (图 3b)。

图 3 同图 1, 但为夏季平均极端大雨日数 (日降水量 ≥ 20mm 的日数, 单位: 天)

Fig. 3 Same as Fig. 1, but for summer mean heavy rain days (daily precipitation ≥ 20 mm, units: d).

从 Ctrl 试验的模拟偏差分布可以看出: 模式对高原以东的川西、青海等地区大雨日数模拟显著偏多, 偏差幅值可达 10 天以上; 我国华南至江淮地区极端降水日数模拟结果显著偏少 2~7 天, 长江中下游及其以南地区偏少可达 7 天以上, 东北地区偏少 1~2 天 (图 3c)。对比 Ctrl 试验, hydroPHS 试验在高原以东的川西、青海等地区降水日数显著减少 2 天以上, 中国东部地区大雨日数增多 1 天, 其中江淮至华北地区显著增多可达 1.5 天, 东北地区增多 0.5 天, 有效减小了模式中极端大雨日数的模拟偏差 (图 3d)。这说明植被水力方案改进不仅能够改善中国夏季降水气候态及年际变率模拟, 也能够提高模式对夏季极端大雨日数的模拟性能。

综上所述, 植被水力方案的改进能够显著提升 CAS-ESM2.0 对中国夏季降水的模拟性能。结合图 1d、图 2d、图 3d 可以发现, 降水模拟的改善在 30°~35°N 范围内相对更为显著, 主要包括长江中下游至黄淮流

域以及青藏高原地区。

错误!未找到引用源。进一步给出了 hydroPHS 试验中以及 30°~35°N 范围内比湿及垂直速度的响应情况。错误!未找到引用源。a 为 hydroPHS 试验相比 Ctrl 试验的总云量模拟差异, 结果显示 hydroPHS 试验在高原地区夏季云量增多 10% 以上, 高原以东至河套地区云量减少 2~10%, 江淮至华北地区云量增加 4~10%, 云量增多(减少)的区域与降水负(正)偏差减小的区域相吻合。错误!未找到引用源。b 展示了 hydroPHS 试验相比 Ctrl 试验沿 30°~35°N 平均纬向垂直剖面的比湿及垂直速度模拟差异。结果显示, 植被水力方案改进后, 长江至黄淮流域(110°E 以东)以及青藏高原大部(80°~95°E)地面至对流层高层出现正比湿差异中心以及增强的垂直上升运动异常, 有利于云量增多和降水形成, 减小模式降水干偏差; 高原以东的川西等区域上空为负比湿差异中心, 对应下沉运动增强的异常, 抑制云量和降水, 减小降水模拟湿偏差。

图 4 hydroPHS 试验与 Ctrl 两组试验模拟的夏季平均 (a) 总云量差异 (单位: %) 的空间分布图以及 (b) 沿 30°~35°N 平均的比湿 (填色, 单位: g kg^{-1}) 和垂直环流 (箭头, 垂直速度与纬向风合成矢量, 其中垂直速度单位为 $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$, 纬向风单位为 m s^{-1}) 差异的纬向垂直剖面图。

Figure 4 Summer mean differences between hydroPHS and Ctrl simulation (hydroPHS minus Ctrl) of (a) total cloud cover (units: %) and (b) longitude-vertical sections of specific humidity (shading, units: g kg^{-1}) and vertical circulation (arrows, combined vector of vertical velocity and zonal wind, where the unit of vertical velocity is $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$ and the unit of zonal wind is m s^{-1}) averaged at the 30°~35°N latitudes.

4 植被水力方案改进对降水模拟的影响机制

4.1 土壤湿度及地表通量模拟

植被水力过程能够通过根系及蒸腾影响土壤水分和陆气之间的地表感热和潜热通量交换。为探究植被水力方案改进影响中国夏季降水模拟的过程和可能机制, 本节进一步对两组试验的土壤湿度、地表感热通量、地表潜热通量的模拟结果进行对比分析。

图 4 展示了中国夏季表层 (0~7cm)、次表层 (7~28cm) 土壤湿度气候态模拟偏差及差异的空间分布。从图 4a 可以看出, Ctrl 试验对中国西部尤其是高原以东的川西区域等地的表层土壤湿度模拟显著偏高, 幅值可达 $0.2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, 在西南及江淮流域存在显著模拟负偏差, 幅值在 $0.04\sim0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 之间。图 4c 给出了 Ctrl 试验次表层土壤湿度的模拟偏差分布, 总体呈现出东南偏干西北偏湿的分布特征: 长江中下游以南、西南地区以及青藏高原西部存在 $0.04\sim0.20 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 的显著干偏差; 青藏高原以东、河套地区、西北以及东北地区存在显著湿偏差, 幅值可达 $0.16 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 。

图 4 1981~2014 年中国夏季平均土壤湿度 (单位: $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) 差异的空间分布: (a) 0~7cm 表层 Ctrl 试验与观测的模拟偏差 (Ctrl 减 ERA5-Land); (b) 0~7cm 表层 hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟差异 (hydroPHS 减 Ctrl); (c) 7~28cm 次表层 Ctrl 试验模拟偏差 (Ctrl 减去 ERA5-Land); (d) 7~28cm 次表层 hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟差异 (hydroPHS 减 Ctrl)。打点区域表示通过 95% 显著性检验。

Fig. 4 Spatial distributions of summer mean soil moisture (units: $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) differences over China during 1981~2014 : (a) Ctrl simulation biases compared to observations (Ctrl minus ERA5-Land) for 0~7 cm topsoil; (b) differences between hydroPHS and Ctrl for 0~7 cm topsoil (hydroPHS minus Ctrl); (c) Ctrl simulation bias compared to observations for 7~28 cm subsoil (Ctrl minus ERA5-Land); (d) differences between hydroPHS and Ctrl for 7~28 cm subsoil (hydroPHS minus Ctrl). Dotted areas denote the values significant at a confidence level of 95%.

HydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟差异, 在表层及次表层均呈现出与 Ctrl 试验模拟偏差符号相反的空间分布特征 (图 4b、d)。HydroPHS 试验与 Ctrl 试验相比, 在长江中下游流域存在显著土壤湿度正异常, 土壤水分增多; 表层高原以东的川西区域、我国东北地区为显著负响应, 土壤水分减少。这说明植被水力方

案的改进显著减小了模式对高原以东的川西区域、东北地区土壤偏湿，以及东南区域土壤偏干的模拟偏差，改善了 CAS-ESM2.0 对中国夏季土壤湿度的模拟性能。

土壤湿度的变化必然导致地表感热通量以及潜热通量的变化。图 5a 给出了 Ctrl 试验相对观测的地表感热通量模拟偏差分布，模式在长江至华北地区、东北地区存在显著正偏差，幅值达到 $12\sim30\text{ W m}^{-2}$ ；高原中西部感热通量显著偏低 $18\sim30\text{ W m}^{-2}$ 。图 5b 为 hydroPHS 试验相比 Ctrl 试验的感热通量模拟差异。结果显示，植被水力方案改进后，长江中下游至华北地区感热通量显著降低 $5\sim15\text{ W m}^{-2}$ ，广西、贵州、湖南等地也出现感热通量负差异，显著降低了我国中东部地区地表感热模拟正偏差。同时 hydroPHS 试验中青藏高原中西部感热显著增加 15 W m^{-2} ，减小了 Ctrl 试验在高原中西部的模拟负偏差。

图 5 1981~2014 年中国夏季平均地表感热通量（单位： W m^{-2} ）差异的空间分布：（a）Ctrl 试验与观测的模拟偏差（Ctrl 减 ERA5-Land）；（b）hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟差异（hydroPHS 减 Ctrl）。图中打点区域通过 95% 显著性检验。

Fig. 5 Spatial distributions of summer mean surface sensible heat flux (Units: W m^{-2}) differences over China during 1981~2014: (a) Ctrl simulation biases compared to observations (Ctrl minus ERA5-Land); (b) differences between hydroPHS and Ctrl (hydroPHS minus Ctrl). Dotted areas denote the values significant at a confidence level of 95%.

错误!未找到引用源。a 给出了 Ctrl 试验地表潜热通量模拟偏差分布，相比观测总体呈现显著负偏差，大值区主要位于高原中西部以及我国东南地区，偏低 $16\sim32\text{ W m}^{-2}$ 。错误!未找到引用源。b 为 hydroPHS 试验相比 Ctrl 试验的潜热通量模拟差异。结果显示，hydroPHS 试验中长江中下游至华北地区以及我国中西部地区潜热通量显著增加 $5\sim15\text{ W m}^{-2}$ ，高原中西部潜热增加更为显著，幅值达到 20 W m^{-2} 。

图 6 同图 5，但为地表潜热通量（单位： W m^{-2} ）。

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for surface latent heat flux (units: W m^{-2}).

为进一步分析植被水力方案引进对植被蒸散发模拟的影响，错误!未找到引用源。给出了原方案模拟的植被冠层蒸散发与再分析资料的偏差，以及引进 hydroPHS 方案后与原方案模拟结果的差异。从错误!未找到引用源。a 可以发现，Ctrl 试验模拟的植被冠层蒸散发与再分析资料相比存在明显差异，其中在中国东部大部分地区为正偏差，幅值为 $0.3\sim1.2\text{ mm d}^{-1}$ ，在青藏高原大部地区则为负偏差。从错误!未找到引用源。b 给出的 hydroPHS 与 Ctrl 试验的模拟差异可以看出，引入新方案后，模式对长江以南以及华北至东北地区植被蒸散发的模拟减小 $0.05\sim0.25\text{ mm d}^{-1}$ ，显著减少了 Ctrl 试验对植被冠层蒸散发模拟过强的偏差，此外，新方案也改善了青藏高原中西部植被蒸散发偏弱的偏差。

比较图 8b 与图 5b，可以发现在青藏高原中西部、黄淮部分地区，引进 hydroPHS 方案后植被蒸散发增加，与上述地区土壤湿度偏干相对应；在长江流域大部地区，引进 hydroPHS 方案否植被蒸散发减少，有利于土壤湿度的增加。但在东北大部地区，引进新方案后植被蒸散发减少，但土壤湿度也同时减小。这说明在季节平均尺度上，植被水力方案对土壤湿度模拟的影响，除了通过直接影响植被蒸散发来影响土壤湿度以外，还会通过改变区域大气环流及陆面-大气相互作用过程导致影响降水，最终再导致土壤湿度的改变。这也进一步表明了陆气相互作用及其对区域气候影响过程的复杂性。

图 8 1981~2014 年中国夏季平均植被冠层蒸散发（单位： mm d^{-1} ）差异的空间分布：（a）Ctrl 试验与观测的模拟偏差（Ctrl 减 ERA5-Land）；（b）hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟差异（hydroPHS 减 Ctrl）。打点区域表示通过 95% 显著性检验。

Fig. 8 Spatial distributions of summer mean plant canopy evapotranspiration (units: mm d^{-1}) differences over China during 1981~2014: (a) Ctrl simulation biases compared to observations (Ctrl minus ERA5-Land); (b) differences between hydroPHS and Ctrl (hydroPHS minus Ctrl). Dotted areas denote the values significant at a confidence level of 95%.

从上述分析可以看到，引入 hydroPHS 方案后可显著改善了模式对中国夏季土壤湿度模拟，同时长江中

下游至华北地区以及青藏高原的地表感热通量、潜热通量的模拟偏差也得到显著降低。说明引入植被水力参数化方案后，提高了 CAS-ESM2.0 对于陆气相互作用的模拟能力。

4.2 季风环流模拟影响

已有研究表明，长江流域土壤湿度偏湿时，地表感热减少潜热增加，东亚海陆热力差异减小，西北太平洋低层出现异常反气旋，使得长江流域受偏南风异常影响导致降水增多（周娟等, 2019; Gao et al., 2019; Zhan and Lin, 2011）。如上节所述，植被水力参数化方案的改进提高了 CAS-ESM2.0 中对土壤湿度以及陆气相互作用的模拟能力，显著改善了长江流域土壤湿度模拟偏干情况。因此，本节进一步分析植被水力方案对季风环流模拟的影响。

图 7a 给出了 Ctrl 试验相比于观测的夏季平均海平面气压模拟偏差，模式在西北太平洋地区海平面气压显著偏低 120~300 Pa，长江至华北地区海平面气压显著偏高约 120Pa。图 7b 给出了 hydroPHS 试验相比 Ctrl 试验的海平面气压模拟差异，西北太平洋地区海平面气压升高 30~50 Pa，中国东部海平面气压降低 20~50Pa，有效降低了 Ctrl 试验的模拟偏差。图 8a、b 分别给出了 ERA5 和 Ctrl 试验夏季 850hPa 风场气候态空间分布，结果显示 Ctrl 试验能够较好的再现出夏季孟加拉湾至中国东部的西南气流。但是，由图 8c 中 Ctrl 试验 850hPa 风场模拟偏差可以发现，对应图 7a 中西太平洋海平面气压负偏差分布，Ctrl 试验中西北太平洋由于低压偏差影响，存在气旋式风场偏差，其西侧的偏北风偏差影响我国东南以及华北地区，导致模式中低层西南风偏弱。图 8d 给出了 hydroPHS 试验相比 Ctrl 试验的模拟差异，与图 7b 中海平面气压模拟差异对应，南海北部以及菲律宾海域高压响应对应低层出现反气旋式模拟差异，中国东部总体表现为偏南风差异，使得 hydroPHS 试验相比 Ctrl 试验，东亚夏季西南风增强，有利中国东部水汽输送增强，减小中国东部降水模拟干偏差。

图 7 1981~2014 年夏季平均海平面气压（单位：Pa）差异的空间分布：(a) Ctrl 试验与观测的模拟偏差（Ctrl 减 ERA5）；(b) hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟偏差（hydroPHS 减 Ctrl）。图中打点区域通过 95%显著性检验。

Fig. 7 Spatial distributions of summer mean sea level pressure (units: Pa) differences during 1981~2014: (a) Ctrl simulation biases compared to observations (Ctrl minus ERA5); (b) differences between hydroPHS and Ctrl (hydroPHS minus Ctrl). Dotted areas denote the values significant at a confidence level of 95%.

图 8 1981~2014 年夏季平均 850hPa 风场（单位：m s⁻¹）的空间分布：(a) ERA5；(b) Ctrl 试验；(c) Ctrl 试验与观测的模拟偏差（Ctrl 减 ERA5）；(d) hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟差异（hydroPHS 减 Ctrl）。

Fig. 8 Spatial distributions of summer mean 850hPa wind vectors (units: m s⁻¹) during 1981~2014: (a) ERA5; (b) Ctrl; (c) Ctrl simulation biases compared to observations (Ctrl minus ERA5); (d) differences between hydroPHS and Ctrl (hydroPHS minus Ctrl).

图 9 给出了夏季整层水汽输送通量及其散度场气候态观测及模拟结果对比情况。图 9a、b 分别展示了 ERA5 以及 Ctrl 试验中整层水汽输送通量以及散度场的气候态空间分布。结果显示，Ctrl 试验能够较好的再现出孟加拉湾至中国东部地区的水汽输送以及长江中下游至华北地区的水汽散度辐合，但在高原以东的川西地区出现水汽异常辐合大值中心，与图 1b 中降水相对大值区对应。图 9c 给出了 Ctrl 试验整层水汽输送通量及散度场模拟偏差，水汽输送偏差分布与图 8c 风场偏差相匹配，受西太平洋气旋式偏差影响，孟加拉湾至中国东部地区西南水汽输送减弱，中国东部主要为水汽辐散偏差，导致模式在中国东部地区降水偏少。图 9d 给出了 hydroPHS 试验相比 Ctrl 试验的水汽输送及散度场模拟差异。hydroPHS 试验中由于低层高压差异以及反气旋式响应，我国西南地区至江淮流域的西南水汽输送增强，使得水汽辐合增强并进一步输送至华北及东北南部地区，有利于模式降水增多，减小模式在中国东部地区降水负偏差；青藏高原西部存在水汽辐合差异，降低了 Ctrl 试验中的水汽辐散偏差，有利于减小模式在高原西部降水负偏差，同时 hydroPHS

在川西至青海地区出现水汽辐散响应中心，有利于减小模式在该地区的降水显著正偏差。

图 9 1981~2014 年夏季平均整层水汽输送通量（箭头，单位： $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ）及水汽通量散度（填色，单位： $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）的空间分布：(a) ERA5；(b) Ctrl 试验；(c) Ctrl 试验与观测的模拟偏差（Ctrl 减 ERA5）；(d) hydroPHS 试验减去 Ctrl 试验的模拟差异（hydroPHS 减 Ctrl）。

Fig. 9 Spatial distributions of summer mean vertically integrated water vapor flux (arrows, units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and the divergence of the water vapor flux (shading, units: $10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) during 1981~2014: (a) ERA5; (b) Ctrl; (c) Ctrl simulation biases compared to observations (Ctrl minus ERA5); (d) differences between hydroPHS and Ctrl (hydroPHS minus Ctrl).

综上所述，植被水力参数化方案的改进不仅提高了 CAS-ESM2.0 对陆气相互作用的模拟能力，也进一步减小了模式对东亚季风环流的模拟偏差，从而改善模式对中国夏季降水的模拟表现。

5 总结与讨论

本研究基于中国科学院地球系统模式 CAS-ESM2.0，在陆面分量模式 CoLM 中，分别采用改进前后的植被水力方案开展了 34 年的 AMIP 数值模拟试验。利用 CN05.1 资料、ERA5-Land 以及 ERA5 再分析资料对两组试验模拟的东亚地区夏季降水进行了评估，并探究了植被水力模型对东亚夏季降水模拟的影响机制。研究分析表明：

(1) 植被水力方案改进能够显著降低 CAS-ESM2.0 中国夏季降水气候态及年际变率的模拟偏差，对极端大雨日数的模拟同样有显著提高，有效改善了东亚地区夏季降水模拟效果。其中模式对 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 江淮至华北地区以及高原西部的降水低估、高原以东川西等地的降水高估的改进较为明显。

(2) 植被水力方案改进能够显著提高 CAS-ESM2.0 对中国夏季土壤湿度以及地表感热及潜热通量的模拟性能，提高陆气相互作用模拟能力。引入植被水力模型后，长江流域表层和次表层土壤湿度干偏差以及西部地区土壤湿度湿偏差显著减小。同时，长江至华北地区以及青藏高原地表感潜热通量模拟偏差也显著减小。

(3) 植被水力方案改进能够改善东亚季风环流的模拟，从而改善对中国夏季降水的模拟，尤其是在中国东部。引入植被水力模型后，长江流域土壤湿度负偏差减小，模式中海陆热力差异减小，西北太平洋地区出现反气旋式环流响应，使得原本偏弱的低层西南气流增强，输送至江淮、华北地区的水汽增多，从而减少了水汽输送偏差，导致我国东部地区降水干偏差显著减小。

本研究以植被水力参数化方案改进为切入点，展示了气候模式中陆面模式参数化方案及陆气相互作用的改进对模式模拟性能的影响，本研究结果可为改善地球气候系统模式对东亚季风降水的模拟提供新思路，也可为 CAS-ESM2.0 应用于东亚夏季降水的预测提供坚实的模式支撑。值得指出的是，新版本的 CoLM2024 陆面过程模式相对其前一个版本在物理、生态、水文等过程，以及模式结构等方面均有极其显著的改进，因此量化不同过程参数化方案的改进对地球气候系统模式模拟性能的影响，以及不同陆面参数化方案组合对气候模拟不确定性的影响，均有待今后进一步的量化研究。

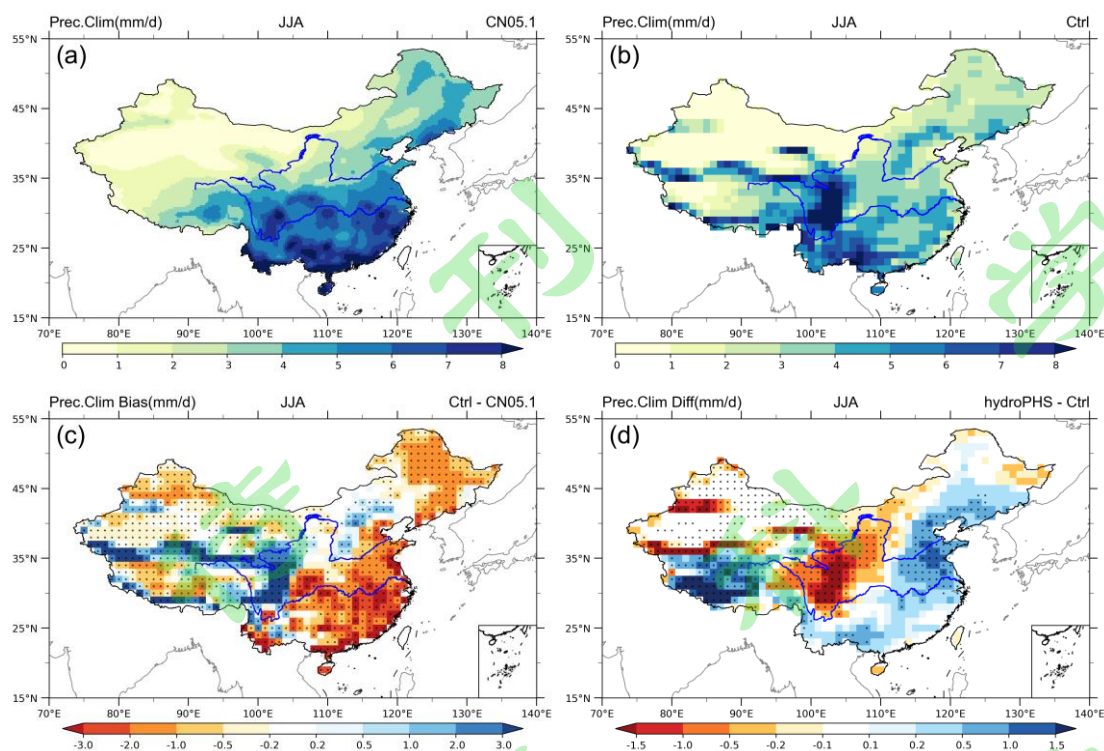


图 10 1981~2014 年中国夏季平均降水 (单位: mm d^{-1}) 空间分布: (a) 观测; (b) Ctrl 试验; (c) Ctrl 试验与观测的模拟偏差 (Ctrl 减 CN05.1); (d) hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟差异 (hydroPHS 减 Ctrl)。图中打点的区域表示通过 95% 显著性检验。

Fig. 10 Spatial distributions of summer mean precipitation (units: mm d^{-1}) over China during 1981–2014: (a) Observations; (b) Ctrl; (c) Ctrl simulation biases compared to observations (Ctrl minus CN05.1); (d) differences between hydroPHS and Ctrl (hydroPHS minus Ctrl). Dotted areas denote the values significant at a confidence level of 95%.

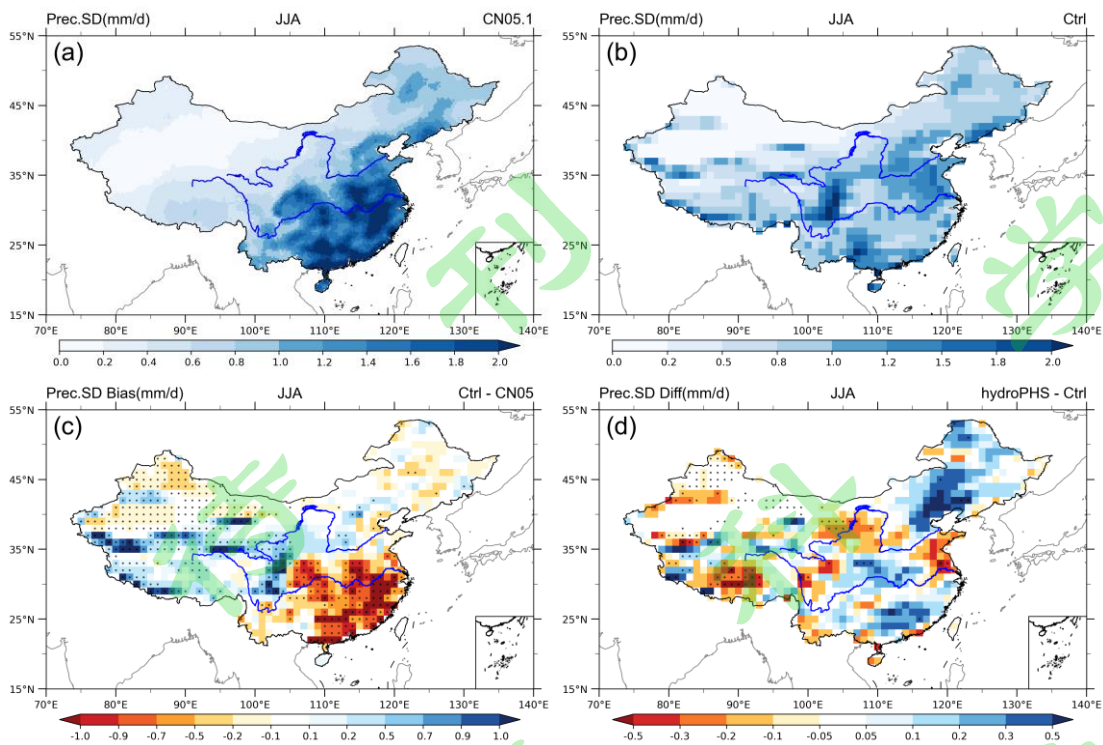


图 11 同图 1，但为夏季降水年际变率（单位：mm d⁻¹）

Fig. 11 Same as Fig. 1, but for summer precipitation interannual variability (units: mm d⁻¹).

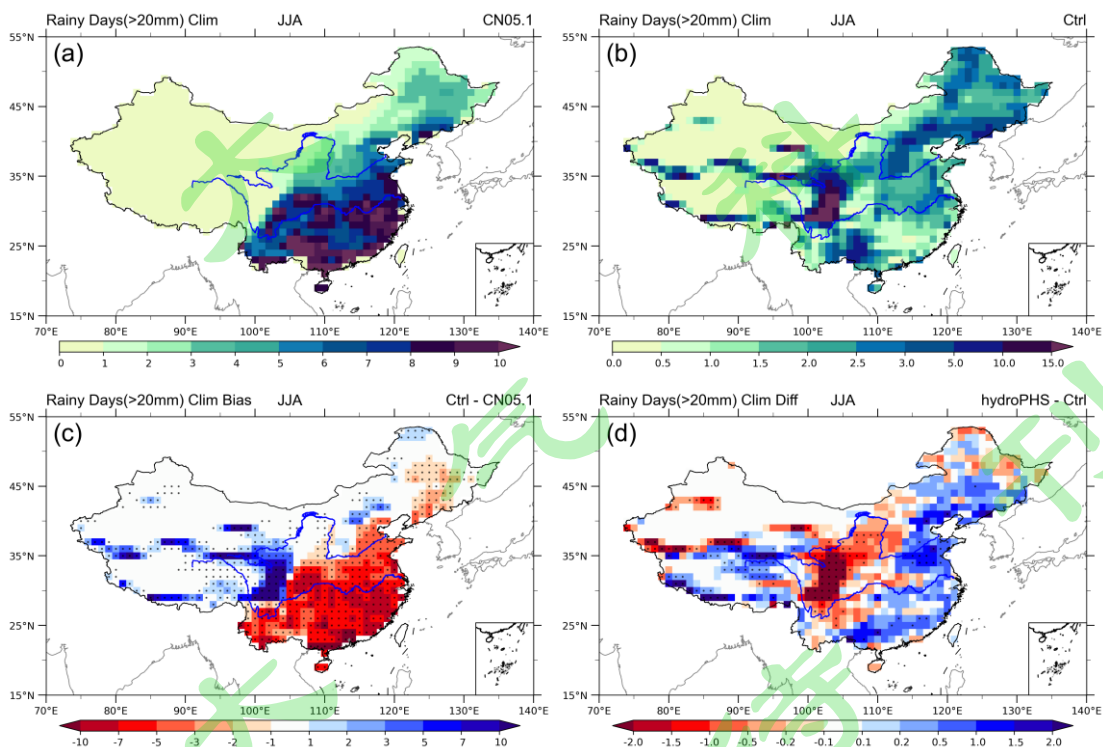


图 12 同图 1，但为夏季平均极端大雨日数（日降水量 ≥ 20 mm 的日数，单位：天）

Fig. 12 Same as Fig. 1, but for summer mean heavy rain days (daily precipitation ≥ 20 mm, units: d).

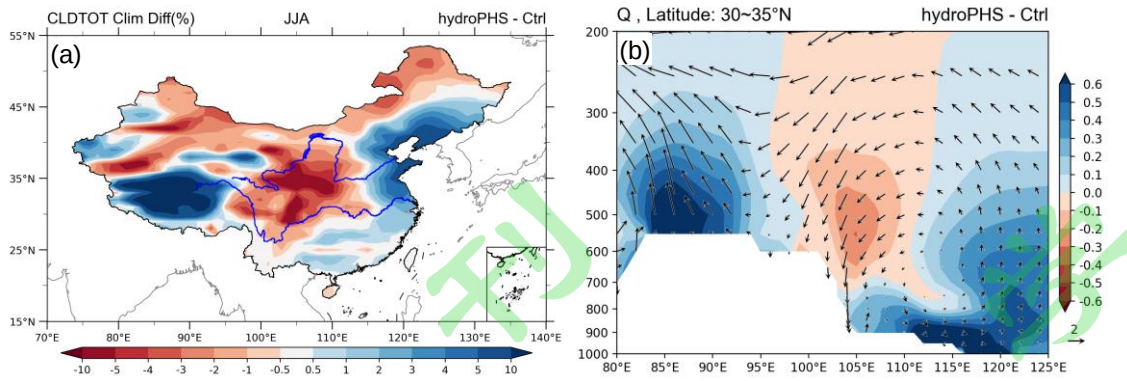


图 4 hydroPHS 试验与 Ctrl 两组试验模拟的夏季平均 (a) 总云量差异 (单位: %) 的空间分布图以及 (b) 沿 30~35°N 平均的比湿 (填色, 单位: g kg^{-1}) 和垂直环流 (箭头, 垂直速度与纬向风合成矢量, 其中垂直速度单位为 $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$, 纬向风单位为 m s^{-1}) 差异的纬向垂直剖面图。

Figure 4 Summer mean differences between hydroPHS and Ctrl simulation (hydroPHS minus Ctrl) of (a) total cloud cover (units: %) and (b) longitude-vertical sections of specific humidity (shading, units: g kg^{-1}) and vertical circulation (arrows, combined vector of vertical velocity and zonal wind, where the unit of vertical velocity is $10^{-2} \text{ Pa s}^{-1}$ and the unit of zonal wind is m s^{-1}) averaged at the 30°~35°N latitudes.

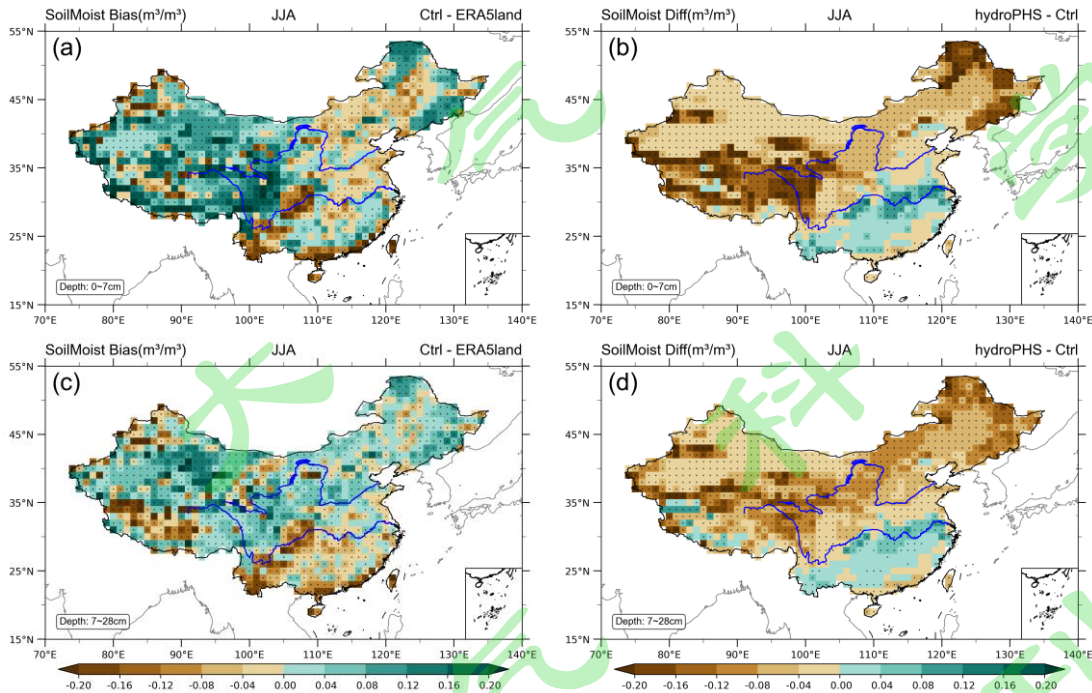


图 13 1981~2014 年中国夏季平均土壤湿度 (单位: $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) 差异的空间分布: (a) 0~7cm 表层 Ctrl 试验与观测的模拟偏差 (Ctrl 减 ERA5-Land); (b) 0~7cm 表层 hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟差异 (hydroPHS 减 Ctrl); (c) 7~28cm 次表层 Ctrl 试验模拟偏差 (Ctrl 减去 ERA5-Land); (d) 7~28cm 次表层 hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟差异 (hydroPHS 减 Ctrl)。打点区域表示通过 95%显著性检验。

Fig. 13 Spatial distributions of summer mean soil moisture (units: $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) differences over China during 1981~2014 : (a) Ctrl simulation biases compared to observations (Ctrl minus ERA5-Land) for 0~7 cm topsoil; (b) differences between hydroPHS and Ctrl for 0~7 cm topsoil (hydroPHS minus Ctrl); (c) Ctrl simulation bias compared to observations for 7~28 cm subsoil (Ctrl minus ERA5-Land); (d) differences between hydroPHS and Ctrl for 7~28 cm subsoil (hydroPHS minus Ctrl). Dotted areas denote the values significant at a confidence level of 95%.

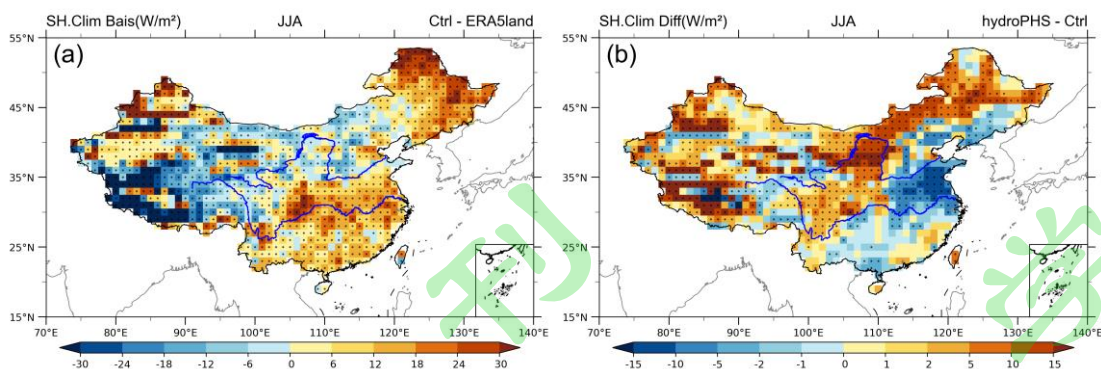


图 14 1981~2014 年中国夏季平均地表感热通量（单位： W m^{-2} ）差异的空间分布：（a）Ctrl 试验与观测的模拟偏差（Ctrl 减 ERA5-Land）；（b）hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟差异（hydroPHS 减 Ctrl）。图中打点区域通过 95%显著性检验。

Fig. 14 Spatial distributions of summer mean surface sensible heat flux (Units: W m^{-2}) differences over China during 1981~2014: (a) Ctrl simulation biases compared to observations (Ctrl minus ERA5-Land); (b) differences between hydroPHS and Ctrl (hydroPHS minus Ctrl). Dotted denote the values significant at a confidence level of 95%.

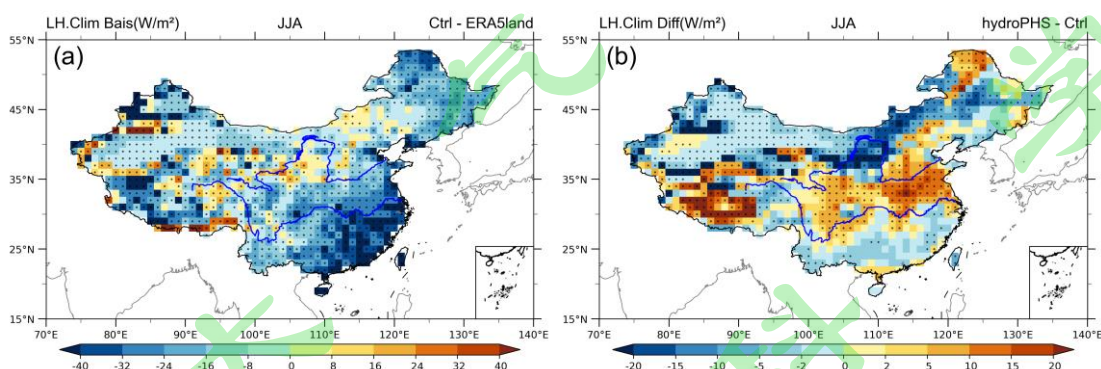


图 15 同图 5，但为地表潜热通量（单位： W m^{-2} ）。

Fig. 15 Same as Fig. 5, but for surface latent heat flux (units: W m^{-2}).

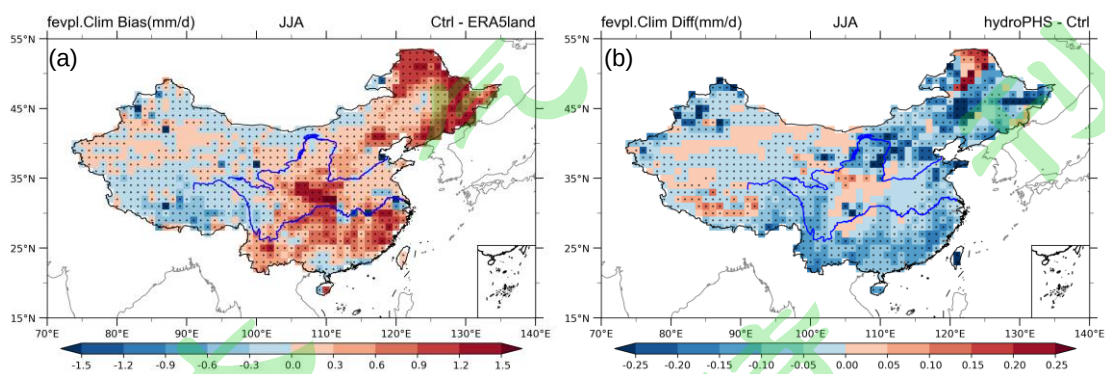


图 8 1981~2014 年中国夏季平均植被冠层蒸散发（单位： mm d^{-1} ）差异的空间分布：（a）Ctrl 试验与观测的模拟偏差（Ctrl 减 ERA5-Land）；（b）hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟差异（hydroPHS 减 Ctrl）。打点区域表示通过 95%显著性检验。

Fig. 8 Spatial distributions of summer mean plant canopy evapotranspiration (units: mm d^{-1}) differences over China during 1981~2014: (a) Ctrl simulation biases compared to observations (Ctrl minus ERA5-Land); (b) differences between hydroPHS and Ctrl (hydroPHS minus Ctrl). Dotted areas denote the values significant at a confidence level of 95%.

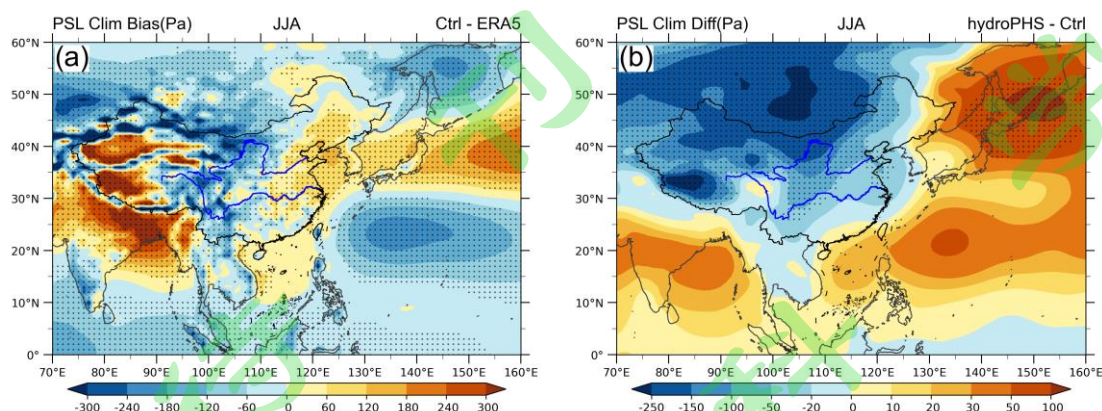
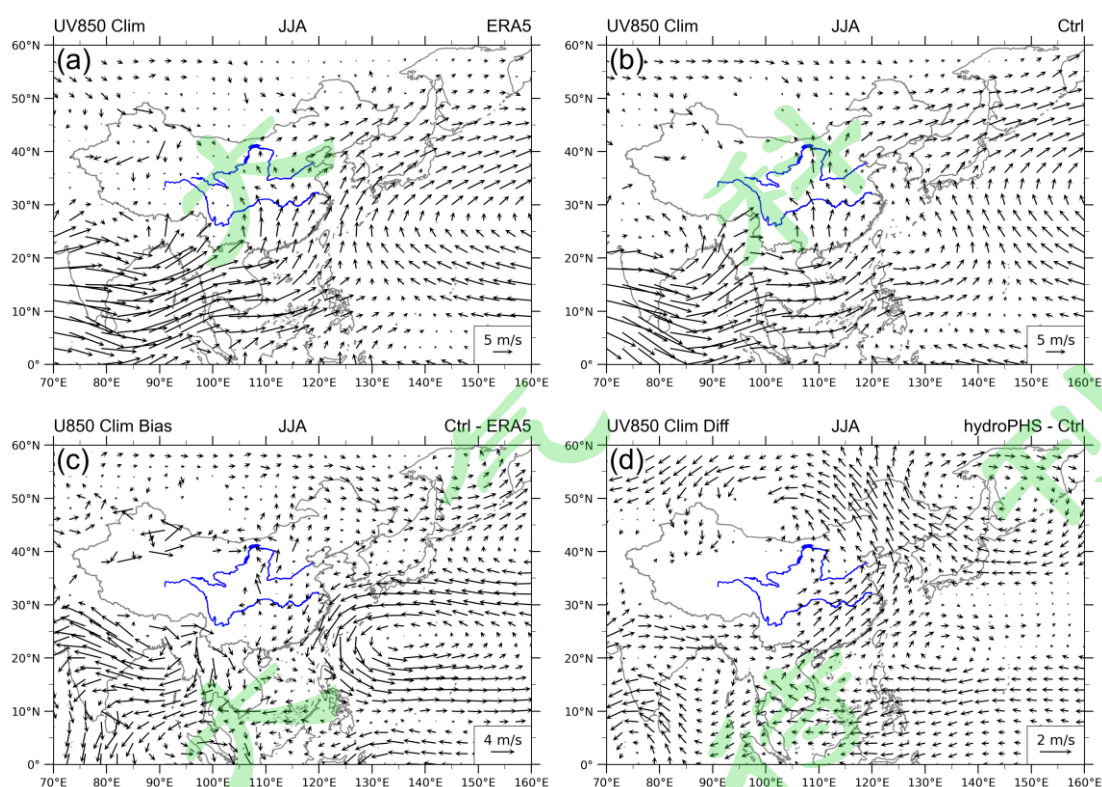


图 16 1981~2014 年夏季平均海平面气压 (单位: Pa) 差异的空间分布: (a) Ctrl 试验与观测的模拟偏差 (Ctrl 减 ERA5); (b) hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟偏差 (hydroPHS 减 Ctrl)。图中打点区域通过 95% 显著性检验。

Fig. 16 Spatial distributions of summer mean sea level pressure (units: Pa) differences during 1981~2014: (a) Ctrl simulation biases compared to observations (Ctrl minus ERA5); (b) differences between hydroPHS and Ctrl (hydroPHS minus Ctrl). Dotted areas denote the values significant at a confidence level of 95%.



1981~2014 年夏季平均 850hPa 风场 (单位: m s^{-1}) 的空间分布: (a) ERA5; (b) Ctrl 试验; (c) Ctrl 试验与观测的模拟偏差 (Ctrl 减 ERA5); (d) hydroPHS 试验与 Ctrl 试验的模拟差异 (hydroPHS 减 Ctrl)。Fig. 17 Spatial distributions of summer mean 850hPa wind vectors (units: m s^{-1}) during 1981~2014: (a) ERA5; (b) Ctrl; (c) Ctrl simulation biases compared to observations (Ctrl minus ERA5); (d) differences between hydroPHS and Ctrl

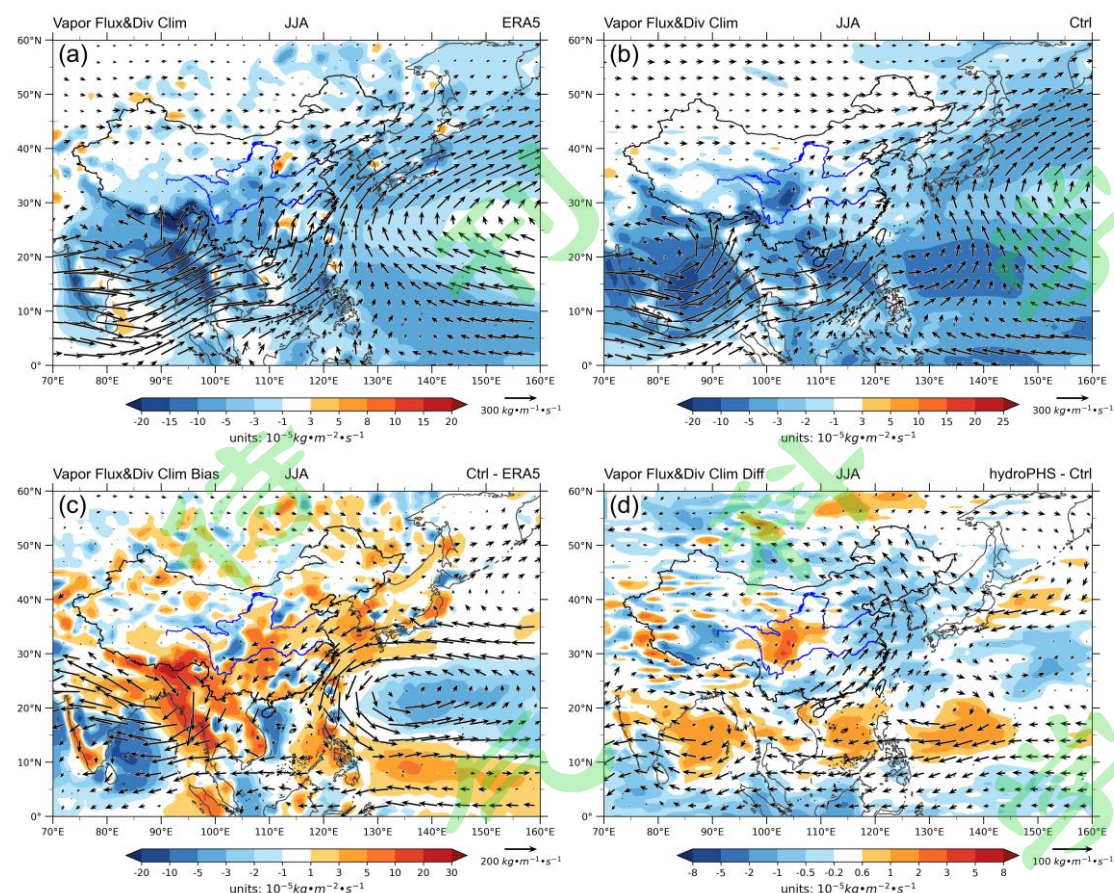


图 18 1981~2014 年夏季平均整层水汽输送通量（箭头，单位： $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ）及水汽通量散度（填色，单位： $10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ）的空间分布：（a）ERA5；（b）Ctrl 试验；（c）Ctrl 试验与观测的模拟偏差（Ctrl 减 ERA5）；（d）hydroPHS 试验减去 Ctrl 试验的模拟差异（hydroPHS 减 Ctrl）。

Fig. 18 Spatial distributions of summer mean vertically integrated water vapor flux (arrows, units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and the divergence of the water vapor flux (shading, units: $10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) during 1981~2014: (a) ERA5; (b) Ctrl; (c) Ctrl simulation biases compared to observations (Ctrl minus ERA5); (d) differences between hydroPHS and Ctrl (hydroPHS minus Ctrl)

参考文献

- Anderegg W R L, Konings A G, Trugman A T, et al., 2018. Hydraulic diversity of forests regulates ecosystem resilience during Drought[J]. *Nature*. 561(7724): 538-541. doi:10.1038/s41586-018-0539-7.
- Bonan G B, Williams M, Fisher R A, et al., 2014. Modeling stomatal conductance in the Earth system: Linking leaf water-use efficiency and water transport along the soil–plant–atmosphere Continuum[J]. *Geoscientific Model Development*. 7(5): 2193-2222. doi:10.5194/gmd-7-2193-2014.
- Bretherton C S, Park S, 2009. A new moist turbulence parameterization in the community atmosphere Model[J]. *Journal of Climate*. 22(12): 3422-3448. doi:10.1175/2008JCLI2556.1.
- Chen H, 2022. Key regions where land surface processes shape the east asian Climate[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*. 15(3): 100209. doi:10.1016/j.aosl.2022.100209.
- Chen W, Zhang R H, Wu R G, et al., 2023. Recent advances in understanding Multi-scale climate variability of the asian Monsoon[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*. 40(8): 1429-1456. doi:10.1007/s00376-023-2266-8.
- Choat B, Jansen S, Brodribb T J, et al., 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to Drought[J]. *Nature*. 491(7426): 752-755. doi:10.1038/nature11688.
- 戴永久, 袁华, 曾晓东, 等, 2024. 通用陆面模式 2024 [EB/OL]. [2025-03-04]. Dai Yongjiu, Yuan Hua, Zeng Xiaodong, et al., Common Land Model 2024 [EB/OL]. [2025-03-04].
<https://github.com/CoLM-SYSU/CoLM-doc/tree/main/CoLM-Latex>
- Dai Y J, Dickinson R E, Wang Y P, 2004. A Two-big-leaf model for canopy temperature, photosynthesis, and stomatal Conductance[J]. *Journal of Climate*. 17(12): 2281-2299.
- Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, et al., 2003. The Common Land Model[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 84(8): 1013-1024. doi:10.1175/BAMS-84-8-1013.
- Evans J P, Imran H M, 2024. The observation range adjusted method: A novel approach to accounting for observation uncertainty in model Evaluation[J]. *Environmental Research Communications*. 6(7): 71001. doi:10.1088/2515-7620/ad5ad8.
- Gao C J, Chen H S, Li G, et al., 2019. Land–atmosphere interaction over the indo-china peninsula during spring and its effect on the following summer climate over the Yangtze River Basin[J]. *Climate Dynamics*. 53(9-10): 6181-6198. doi:10.1007/s00382-019-04922-x.
- Geen R, Pietschnig M, Agrawal S, et al., 2023. The relationship between model biases in east asian summer monsoon rainfall and land Evaporation[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*. 40(11): 2029-2042. doi:10.1007/s00376-023-2297-1.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al., 2020. The ERA5 global Reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 146(730): 1999-2049. doi:10.1002/qj.3803.
- 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]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 113(D13). doi:10.1029/2008JD009944.
- Ji D Y, Wang L N, Feng J, et al., 2014. Description and basic evaluation of Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM) version 1[J]. *Geoscientific Model Development*. 7(5): 2039-2064. doi:10.5194/gmd-7-2039-2014.
- Kennedy D, Swenson S, Oleson K W, et al., 2019. Implementing plant hydraulics in the community land model, version 5[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 11(2): 485-513. doi:10.1029/2018MS001500.
- Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al., 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and Precipitation[J]. *Science*. 305(5687): 1138-1140. doi:10.1126/science.1100217.
- Lawrence D M, Fisher R A, Koven C D, et al., 2019. The community land model version 5: Description of new features, benchmarking, and impact of forcing Uncertainty[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*.

- 11(12): 4245-4287. doi:10.1029/2018MS001583.
- Li Z Y, Liu T, Huang Y, et al., 2022. Evaluation of the CMIP6 precipitation simulations over global Land[J]. *Earth's Future*. 10(8): e2021EF002500. doi:10.1029/2021EF002500.
- Li H M, Lu X J, Wei Z W, et al., 2021. New representation of plant hydraulics improves the estimates of transpiration in land surface Model: 6[J]. *Forests*. 12(6): 722. doi:10.3390/f12060722.
- Li C W, Lu H, Yang K, et al., 2017. Evaluation of the Common Land Model (CoLM) from the Perspective of Water and Energy Budget Simulation: Towards Inclusion in CMIP6: 8[J]. *Atmosphere*. 8(8): 141. doi:10.3390/atmos8080141.
- 林朝晖, 刘辉志, 谢正辉, 等, 2008. 陆面水文过程研究进展[J]. *大气科学*. 32(4): 935-949. Lin Zhaohui, Liu Huizhi, Xie Zhenghui, et al. 2008: Recent Progress in the Land-Surface and Hydrological Process Studies. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(4): 935-949. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.19.
- Liu X, Easter R C, Ghan S J, et al., 2012. Toward a minimal representation of aerosols in climate models: Description and evaluation in the community atmosphere model CAM5[J]. *Geoscientific Model Development*. 5(3): 709-739. doi:10.5194/gmd-5-709-2012.
- 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]. *Journal of Climate*. doi:10.1175/2008JCLI2105.1.
- Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, et al., 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land Applications[J]. *Earth System Science Data*. 13(9): 4349-4383. doi:10.5194/essd-13-4349-2021.
- Niu G Y, Yang Z L, 2006. Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental Scale[J]. *Journal of Hydrometeorology*. 7(5): 937-952. doi:10.1175/JHM538.1.
- Niu G Y, Yang Z L, Dickinson R E, et al., 2007. Development of a simple groundwater model for use in climate models and evaluation with gravity recovery and climate experiment Data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 112(D7). doi:10.1029/2006JD007522.
- Pan X D, Chen D L, Pan B X, et al., 2025. Evolution and prospects of Earth system models: Challenges and Opportunities[J]. *Earth-Science Reviews*. 260: 104986. doi:10.1016/j.earscirev.2024.104986.
- 彭静漫, 刘少锋, 戴永久, 等, 2020. 基于陆面模式基准平台 ILAMB 对陆面模式 CoLM 的评估[J]. *气候与环境研究*. 25(6): 649-666. Peng Jingman, Liu Shaofeng, Dai Yongjiu, et al. 2020. Evaluation of Common Land Model Based on International Land Model Benchmarking System [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 25 (6): 649-666. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20021.
- Shi P F, Lu H, Leung L R, et al., 2021. Significant land contributions to interannual predictability of east asian summer monsoon Rainfall[J]. *Earth's Future*. 9(2): e2020EF001762. doi:10.1029/2020EF001762.
- 田风云, 吴成来, 张贺, 等, 2021. 基于 CAS-ESM2 的青藏高原蒸散发的模拟与预估[J]. *地球科学进展*. 36(8): 797-809. Tian Fengyun, Wu Chenglai, Zhang He, et al. Simulation and projection of evapotranspiration over the Tibetan Plateau based on CAS-ESM2[J]. *Advances in Earth Science*, 2021, 36(8): 797-809. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2021.084.
- 吴佳, 高学杰, 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J]. *地球物理学报*. 56(4): 1102-1111. Wu Jia, Gao XueJie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 2013, 56(4): 1102-1111. doi:10.6038/cjg20130406.
- Wu J, Gao X J, Giorgi F, et al., 2017. Changes of effective temperature and cold/hot days in late decades over China based on a high resolution gridded observation Dataset[J]. *International Journal of Climatology*. 37(S1): 788-800. doi:10.1002/joc.5038.

- Xie X, Zhang M H, 2015. Scale-aware parameterization of liquid cloud inhomogeneity and its impact on simulated climate in CESM[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 120(16): 8359-8371. doi:10.1002/2015JD023565.
- Xie X N, Zhang H, Liu X D, et al., 2018. Role of microphysical parameterizations with droplet relative dispersion in IAP AGCM 4.1[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*. 35(2): 248-259. doi:10.1007/s00376-017-7083-5.
- Xie J B, Zhang M H, Zeng Q C, et al., 2021. Implementation of an orographic drag scheme considering orographic anisotropy in all flow directions in the Earth system model CAS-ESM 2.0[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 13(12): e2021MS002585. doi:10.1029/2021MS002585.
- Xin X G, Wu T W, Zhang J, et al., 2020. Comparison of CMIP6 and CMIP5 simulations of precipitation in China and the east asian summer Monsoon[J]. *International Journal of Climatology*. 40(15): 6423-6440. doi:10.1002/joc.6590.
- Yang X L, Zhou B T, Xu Y, et al., 2021. CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*. 38(5): 817-830. doi:10.1007/s00376-021-0351-4.
- 曾庆存, 林朝晖, 2010. 地球系统动力学模式和模拟研究的进展[J]. *地球科学进展*. 25(1): 1-6. Zeng Qingcun, Lin Zhaohui. Recent progress on the earth system dynamical model and its numerical simulations[J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 2010, 25(1): 1-6. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2010.01.0001.
- Zhan Y L, Lin Z H, 2011. The relationship between june precipitation over Mid-lower reaches of the Yangtze River basin and spring soil moisture over the east asian monsoon Region[J]. *Acta Meteorologica Sinica*. 25(3): 355-363. doi:10.1007/s13351-011-0310-6.
- Zhang Y, Chen H M, 2016. Comparing CAM5 and superparameterized CAM5 simulations of summer precipitation characteristics over continental east Asia: Mean state, frequency–intensity relationship, diurnal cycle, and influencing Factors[J]. *Journal of Climate*. 29(3): 1067-1089. doi:10.1175/JCLI-D-15-0342.1.
- Zhang X X, Dai Y J, Cui H Z, et al., 2017. Evaluating common land model energy fluxes using FLUXNET Data[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*. 34(9): 1035-1046. doi:10.1007/s00376-017-6251-y.
- Zhang H, Zhang M H, Jin J B, et al., 2020. Description and climate simulation performance of CAS-ESM version 2[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 12(12): e2020MS002210. doi:10.1029/2020MS002210.
- 周娟, 左志燕, 容新尧, 2019. 中国东部土壤湿度异常和厄尔尼诺对中国东部夏季降水的作用比较[J]. *中国科学: 地球科学*. 50(1): 149-160. Zhou Juan, Zuo Zhiyan, Rong Xinyao. 2020. Comparison of the effects of soil moisture and El Niño on summer precipitation in eastern China. *Science China Earth Sciences (in Chinese)*, 63: 267–278. doi:10.1360/N072018-00329.
- 周天军, 陈梓明, 邹立维, 等, 2020. 中国地球气候系统模式的发展及其模拟和预估[J]. *气象学报*. 78(3): 332-350. Zhou Tianjun, Chen Ziming, Zou Liwei, et al. 2020. Development of climate and earth system models in China: Past achievements and new CMIP6 results. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 78(3):332-350. doi:10.11676/qxxb2020.029.
- Zhu S G, Chen H S, Zhang X X, et al., 2017. Incorporating root hydraulic redistribution and compensatory water uptake in the common land model: Effects on site level and global land Modeling[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 122(14): 7308-7322. doi:10.1002/2016JD025744.
- 邹靖, 谢正辉, 2012. RegCM4 中陆面过程参数化方案对东亚区域气候模拟的影响[J]. *气象学报*. (6): 1312-1326. Zou Jing, Xie Zhenghui. 2012. The effects of the land-surface process parameterization of the RegCM4 on climate simulation in East Asia. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, (6): 1312-1326. doi:10.11676/qxxb2012.110.