

古今暖期对比研究预警未来南亚季风的变化

黄建平

兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

E-mail: hjp@lzu.edu.cn

Past warm intervals warn the future risk of South Asian monsoon as analogues

Jianping Huang

College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

E-mail: hjp@lzu.edu.cn

南亚夏季风是南亚地区雨季的“开关”。每年夏季, 季风把大量水汽从海洋输送至陆地, 为印度半岛及其周边区域带来约 80% 的年降水量^[1,2]。南亚夏季风直接关系到全球近四分之一人口的生产生活, 其异常不仅可能引发严重的旱涝灾害, 威胁当地的社会经济发展、生态系统稳定与水资源安全, 还可通过水汽输送通道影响至青藏高原南部地区。伴随着全球变暖, 未来南亚季风将如何变化是一个众所关注的问题。

基于“国际耦合模式比较计划”(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP) 的气候模式预估显示, 在未来增暖情景下, 南亚夏季风降水将持续增加, 但驱动降水变化的季风环流却呈现出减弱趋势^[3~5]。这种“环流减弱而降水却增加”的现象, 被视为南亚夏季风预估的悖论。同时, 受气候模式性能的影响, 当前的气候模式在预估未来季风变化方面存在不确定性^[6], 近年来提出的基于历史观测的“涌现约束”方法能够部分减少不确定性^[7], 但难以从根本上解决问题。

地球历史上曾经历过比当前更暖的时期, 这为认识未来增暖情景下的气候变化提供了重要的参照^[8]。例如, 通过开展早始新世(距今约 6500 万年前)的气候模拟, 结合温度重建记录, 科学界成功对平衡态“气候敏感度”这一衡量大气 CO₂ 浓度翻倍所引起的全球平均变暖幅度的关键指标进行了有效的约束估算^[9]。然而, 在区域尺度上, 古气候暖期对于未来气候变化的指示意义仍不明确。以南亚夏季风为例, 与未来增暖情景预估中普遍呈现的区域平均“环流减弱、降水增加”态势不同, 古气候记录和模拟显示在多个过去暖期, 南亚夏季风表现出区域

平均“环流增强、降水增加”的特征^[10,11]。在季风区，古暖期能否被视为未来增暖的参照物、古今暖期季风变化的机制有何异同，是一个重要但悬而未决的挑战性问题。

最近，中国科学院大气物理研究所周天军研究员团队发现，在现代海陆分布与地理格局基本形成后的三个古暖期，尽管外强迫驱动因子彼此不同，也与未来气候预估的驱动因子有异，但这些古今暖期的南亚夏季风变化特征和机制具有相似性^[12]。他们基于气候模式数值实验，系统研究了涵盖过去和未来的共六种代表性增暖情景下的南亚季风变化，包括中上新世（距今 330~300 万年前）、末次间冰期（距今 12.7 万年前）、中全新世（距今 6000 年前）以及三种不同的共享社会经济路径（Shared Socioeconomic Pathway, 简称 SSP）情景下的未来气候（2071~2100 年），分别对应低（SSP2-4.5）、中（SSP3-7.0）和高（SSP5-8.5）碳排放情景。这些气候暖期受到不同强迫因子的驱动，大气 CO₂ 浓度升高、植被增加和冰盖退缩、地球轨道变化等各自发挥着不同的作用^[12]。

周天军研究员团队^[12]整合了 31 个代用记录和 42 组多个气候模式的模拟数据，利用基于水汽收支方程和湿静力能方程构建的气候动力学诊断框架，有效分离了影响季风降水变化的热力（与水汽变化有关）和动力（与季风环流调整有关）过程。结果发现，尽管不同暖期季风的变化幅度不同，但在过去暖期和未来暖期呈现出相似的空间分布特征，表现为南亚地区降水总体增加，季风环流变化存在空间异质性，孟加拉湾季风槽环流减弱，阿拉伯海北部季风环流增强。古今暖期的季风变化在物理机制上具有相似性。季风降水的整体增加，一方面由于全球温升提高了大气水汽含量，使南亚季风区降水热力项增加、西北部塔尔沙漠降水减少，呈现“湿区更湿，干区更干”的典型分布特征；另一方面，副热带欧亚大陆及北非地表的增暖加强了经向温度梯度，进而驱动南亚季风环流产生反气旋式异常，它通过调节显热输送，使南亚季风降水动力项呈现出“南干北湿”的非均匀空间格局。由于环流变化在空间上的非均匀分布，若仅以区域平均值衡量，则过去暖期的环流变化表现为增强、而未来气候增暖情景下则表现为减弱，这为南亚夏季风环流“过去增强、未来减弱”的表观矛盾陈述提供了合理解释。上述分析揭示了季风环流和降水变化在空间分布上的复杂特征，为理解不同气候暖期的南亚夏季风变化提供了统一的物理机制解释框架。

关于地球过去的暖期是否可以作为未来变暖的参照物, 科学界关注的焦点之一一是驱动不同暖期的外强迫因子不同, 因而古今暖期季风变化的可比性存在争议。针对这一问题, 周天军研究员团队利用气候模式设计了一系列敏感性试验, 系统检验了中纬度植被扩张和极地冰盖退缩、轨道参数变化引起的夏季太阳辐射增强、以及大气 CO_2 浓度升高所产生的直接辐射强迫等过程对气候的影响。数值模拟试验结果表明, 尽管驱动气候变暖的强迫因子不同, 但副热带欧亚大陆及北非地区表现出相似的地表增暖特征, 呈现出相似的经向梯度, 进而能够通过调节季风环流, 在南亚地区引发相似的、空间上非均匀的动力响应过程。

为了探索如何利用过去暖期来指示未来季风变化, 周天军团队进一步利用古气候增暖信息与南亚季风变化的关系, 构建了一个统计预测模型。利用该模型, 作者把未来预估的高排放情景 SSP5-8.5 的增暖特征作为预报因子, 预测得到的南亚季风环流和季风降水与气候模式的直接预估结果在空间相关性上分别达到 0.8 和 0.7 (图 1)。这表明, 地球过去暖期所揭示的南亚季风变化对于未来变化具有重要参考价值。例如, 古气候暖期的地质记录显示, 喜马拉雅山脉沿线区域强降水事件显著增加, 并伴有滑坡、泥石流和冰川雪崩等相关衍生灾害, 这为有效应对未来增暖情景下该区域的极端降水风险提供了重要参考。随着古气候重建和模拟资料的不断丰富, 该统计模型有望进一步优化, 从而能够更好地约约束南亚季风变化与气候增暖之间的关系、提供南亚季风降水变化预测的区域细节信息。同时, 该模型也为基于“涌现约束”等方法建立过去暖期模拟与未来预估之间的联系, 进而降低南亚季风未来变化预估的不确定性、提高预测结果的可靠性提供了物理基础。

周天军研究员团队的这项研究^[12], 既是把现代气候动力学理论用于古气候变化机理解释的一次成功尝试, 又是在区域尺度上利用过去气候来指示未来变化的一次成功实践。该研究表明, 当前已经较为成熟的现代气候动力学理论, 能够帮助我们有效理解古气候记录所展现的看似矛盾的现象; 同时, 通过开展古今对比研究, 我们能够显著提高未来季风变化预测的可靠性。

打破古气候和现代气候研究之间存在的鸿沟, 是探索气候变化新理论的重要途径。将现代气候研究延伸至古气候时期, 有助于我们更为全面地理解气候系统在不同增暖背景下的物理响应机制, 从而构建跨越时空尺度的新的气候变化物理

框架。同时，以古喻今还能够帮助我们未雨绸缪，古气候记录所揭示的气候变化特征及其衍生灾害，有助于预判未来持续增暖背景下极端气候事件频发的潜在风险，从而为科学应对未来气候挑战提供重要参考。

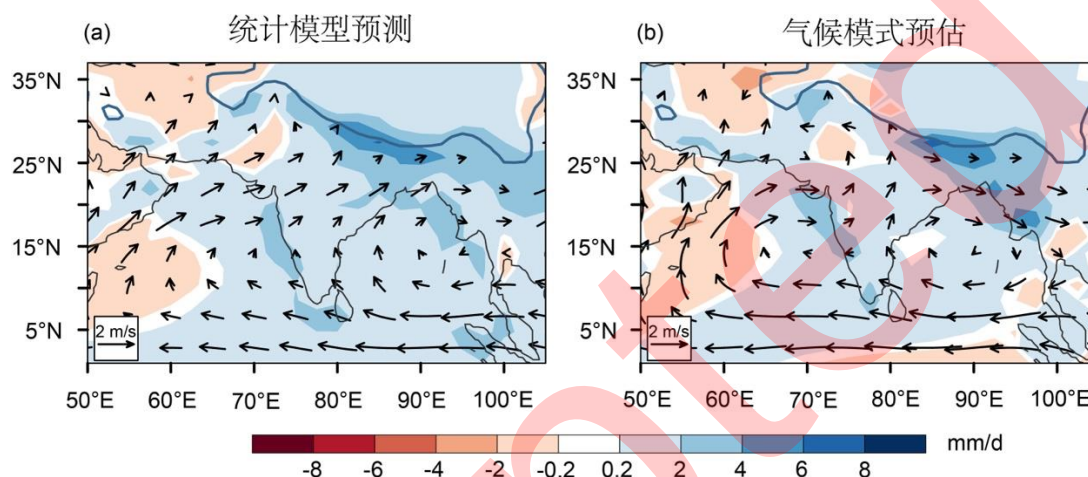


图 1 南亚夏季风变化的未来预测。(a) 基于过去暖期的信息构建的回归模型预测的未来 SSP5-8.5 情景下季风降水热力项与动力学之和（填色）和 850hPa 季风环流（箭头）异常。(b) 同图(a)，但为气候模式的直接预估结果。修改自文献[12]。

Figure 1 Future prediction of South Asian summer monsoon changes. (a) Predicted changes in the sum of thermodynamic and dynamic terms contributing to total monsoon rainfall (shading) and 850hPa monsoon circulation (vectors) under the SSP5-8.5 scenario, derived from the regression model based on paleoclimate information. (b) As in (a), but derived from the multi-model ensemble mean of future projections. Revised from Ref. [12]

参考文献

- [1] Wang B, LinHo. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon. *J Clim*, 2002,15: 386–938
- [2] Turner AG, Annamalai H. Climate change and the South Asian summer monsoon. *Nat Clim Chang*, 2012, 2: 587–95.
- [3] Ueda H, Iwai A, Kuwako K, et al. Impact of anthropogenic forcing on the Asian

- summer monsoon as simulated by eight GCMs. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: 20–23
- [4] Ma J, Yu J-Y. Paradox in South Asian summermonsoon circulation change: Lower tropospheric strengthening and upper tropospheric weakening. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 2934–2940.
- [5] Li T, Wang Y, Wang B, et al. Distinctive South and East Asian monsoon circulation responses to global warming. *Sci Bull*, 2022, 67: 762–770.
- [6] Zhou T, Lu J, Zhang W, et al. The Sources of Uncertainty in the Projection of Global Land Monsoon Precipitation. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2020GL088415
- [7] Chen Z, Zhou T, Chen X, et al. Observationally constrained projection of Afro-Asian monsoon precipitation. *Nature Communications*, 2022, 13: 2552
- [8] Tierney J E, Poulsen C J, Montañez I P, et al. Past climates inform our future. *Science*, 2020, 370: eaay 3701.
- [9] Zhu J, Poulsen C J, Otto-Bliesner B L. High climate sensitivity in CMIP6 model not supported by paleoclimate. *Nat Clim Chang*, 2020, 10: 378–379.
- [10] Han Z, Li G. The changes in south Asian summer monsoon circulation during the mid-Piacenzian warm period. *Clim Dyn*, 2024, 62: 5845–5862.
- [11] Wang Y, He C, Li T, et al. Distinctive changes of Asian – African summer monsoon in interglacial epochs and global warming scenario. *Clim Dyn*, 2023, 62: 2129–2145
- [12] He L, Zhou T, Guo Z. Past warm intervals inform the future South Asian summer monsoon. *Nature*, 2025, 641: 653–659