

全新世东亚夏季风演变的争议：一种基于机理解析的调和

程 军^{1*}, 刘一陶¹, 吴海斌², 刘征宇³

1. 南京信息工程大学 海气相互作用研究中心, 南京 210044

2. 中国科学院地质与地球物理研究所 新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029

3. Department of Geography, Ohio State University, OH 43210, USA

东亚夏季风是维持东亚地区生态、环境基本状态的主导性大气环流系统, 其在古气候记录相对丰富的全新世时期的演变是认知长期气候变化下东亚夏季风响应特征、响应机制及其生态、环境影响的基础, 对于理解及预测当前全球增暖下东亚夏季风的演变具有重要意义。

全新世时期地质记录对东亚夏季风演变的指示存在系统性差异。如洞穴石笋氧同位素记录指示东亚夏季风于全新世早期最强 (Wang et al, 2005), 东亚夏季风在全新世阶段的持续减弱被该时期北半球夏季太阳辐射的逐渐减少主导 (Kutzbach and Street-Perrott, 1985); 而北方的黄土 (Lu et al, 2013)、沙墩 (Lu et al, 2005; Xu et al, 2020)、古土壤 (Li et al, 2014) 及植被 (Li et al, 2014; Chen et al, 2015) 等生态、环境记录则指示东亚夏季风于全新世中期最盛, 早—中全新世阶段东亚夏季风的增强由高纬冰盖/CO₂ (Lu et al, 2013)、陆面过程反馈 (Lu et al, 2005)、高纬冰盖/大西洋经向翻转环流 (AMOC, Chen et al, 2015) 等主导。早—中全新世阶段东亚夏季风演变的记录间差异严重阻碍了对该时期东亚夏季风演变特征、主导因素等方面的认识 (Peterse et al, 2011), 同时不可避免地引起了对相应东亚夏季风地质记录代表性的质疑 (Liu et al, 2015)。

在地质记录间存在系统性差异的背景下, 如何认识全新世东亚夏季风的实际演变, 不仅关系到该时期东亚夏季风演变主导驱动因素及响应动力学机制的重新认识, 也涉及东亚夏季风地质记录间的调和问题。能够解析太阳辐射、CO₂、冰盖、AMOC 等外强迫因素对东亚夏季风的不同影响, 并能够再现记录分析所推测的东亚夏季风与生态、环境内部反馈过程 (Lu et al, 2005; Chen et al, 2015) 的古气候瞬时模拟 (TraCE21ka, Liu et al, 2009), 为基于季风及生态、环境机理破解该系列难题提供了可能的机会。基于该模拟与记录的有机结合, Cheng et al (2021) 针对该系列问题开展了探索性的工作。

如图 1 所示, TraCE21ka 模拟同时再现了石笋氧同位素与北方土壤湿度、植被记录间的非同步演变, 并进一步指示早全新世最强的东亚夏季风与中全新世最优的北方生态、环境或许能够同时存在, 即早—中全新世阶段可能存在东亚夏季风减弱与北方生态、环境优化的阶段性非同步演变 (Cheng et al, 2021)。该基于模拟与记录相结合的新认识可有效调和两种记录对东亚夏季风演变指示的分异性特征, 但是否成立需解释早全新世东亚夏季风为何最强, 以及明确早—中全新世阶段东亚夏季风减弱背景下北方生态、环境为何优化的问题。

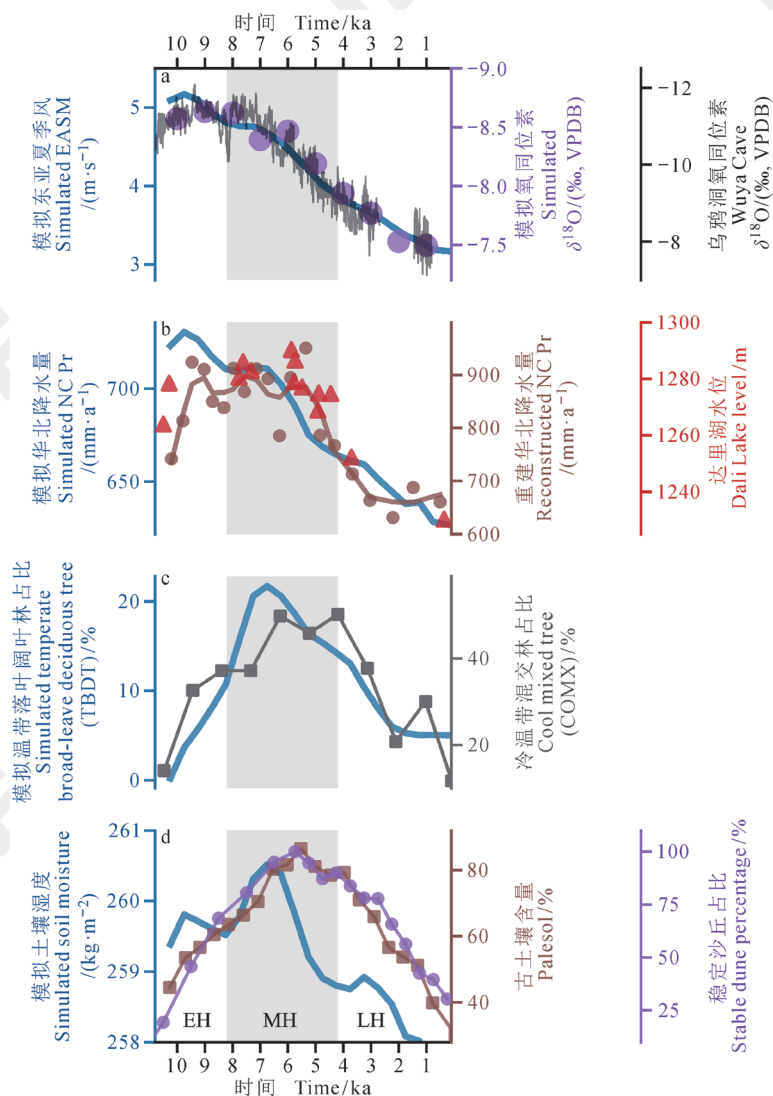
TraCE21ka 模拟单强迫试验的分析表明: 前人基于记录间比对及模式敏感性试验所提出的气候变化各强迫因素对东亚夏季风演变的影响确实成立, 比如北半球夏季辐射的减弱可导致东亚夏季风的减弱 (Wang et al, 2005)、高纬冰盖消融及 AMOC 强度增强可导致东亚夏季风的增强 (Lu et al, 2013; Chen et al, 2015) 等, 但各自的相对贡献存在差异。TraCE21ka 模拟及其单强迫试验间的量化对比分析表明: 早—中全新世阶段东亚夏季风的减弱由太阳辐射的演变主导, 其结果与东亚夏季风敏感性的认识相一致 (Cheng et al, 2019)。太阳辐射减弱导致的东亚夏季风北方降水减少幅度的约 2/3 被高纬冰盖消融导致的降水增多效应抵消 (Cheng et al, 2021)。

早—中全新世阶段北方降水小幅度减少背景下, 制约当地植被种属间大幅度更替 (Li et al, 2014) 的关键因素是冬季的大幅升温过程。早全新世时期北半球中高纬地区太阳辐射的冬、夏季差异 (即岁差) 为近 70 ka 以来最强 (Kutzbach et al, 2020)。早—中全新世阶段冬季太阳辐射的逐渐增强, 以及北半球高纬度地区冰盖的进一步消融, 导致北半球冬季气温的大幅升高。当冬季最低温逐渐高于 -17°C 时, 基于温度阈值效应 (Bonan et al, 2003), 北方的温带落叶阔叶林逐渐增多、草逐渐减少。通过模

拟结果中土壤水文平衡过程的量化分析发现: 该植被种属间的大幅转换可导致土壤湿度的显著增大。传统认识认为, 北方半干旱区土壤湿度的演变一般应被季风降水的变化主导, 但是在早—中全新世阶段季风降水平均强度大且减弱幅度小的背景下, 模拟结果分析指出, 植被更替所导致的植被蒸腾强度的变化可主导该区域土壤湿度变化的方向。此“冬季温度主控的植被演替及其土壤水文影响”的新认识, 强调了植被温度阈值效应 (Bonan et al, 2003) 的关键作用, TraCE21ka 模拟的结果与相应记录高度一致, 且在陆面—动态植被耦合模式的系列敏感性试验中得到进一步的验证 (Cheng et al, 2021)。

Cheng et al (2021) 通过记录与模拟的有机结合, 在季风动力学机理及生态、环境机理剖析的基础上, 探索性地提出了早—中全新世阶段东亚夏季风减弱与北方生态、环境优化非同步演变的观点。该观点有效调和了东亚夏季风记录间的争议问题, 加深了对全新世东亚夏季风演变及其与生态、环境演变关系的认识。同时, 需强调的是, 该非同步演变的背景是早全新世时期冬、夏季太阳辐射及气温的强季节性, 以及随后阶段冬、夏季太阳辐射与气温的反向变化 (季节性减弱), 因此该非同步演变具有阶段性的限制。中—晚全新世阶段季节性的影响基本可忽略, 北方生态、环境的演化与东亚夏季风同步, 记录之间及记录与模拟间高度一致。

Cheng et al (2021) 所建立



a: 乌鸦洞石笋氧同位素记录 (黑线, Tan et al, 2020) 及其基于 TraCE21ka 的模拟 (紫色点, Liu et al, 2014)、TraCE21ka 模拟的东亚夏季风环流 (蓝线, 110°—120°E、27°—37°N 区域平均的 850 hPa 经向风); b: 达里湖水位 (红三角, Goldsmith et al, 2017)、基于黄土 ^{10}Be 重建 (棕色点和线, 宝鸡, Beck et al, 2018) 和 TraCE21ka 模拟的华北年累计降水 (蓝线, 107.5°—130°E、37°—45°N 区域); c: 华北区域基于孢粉重建的冷温带混交林占比 (灰点线, COMX, Li et al, 2014), TraCE21ka 模拟的温带落叶阔叶林占比 (蓝线); d: 华北区域古土壤含量 (棕色点线, Li et al, 2014)、稳定沙丘占比 (紫色点线, Xu et al, 2020) 和 TraCE21ka 模拟的华北表层土壤湿度 (蓝线)。中全新世 (Mid-Holocene, MH) 时段以灰色阴影表示, 以与早全新世 (Early Holocene, EH) 及晚全新世 (Late Holocene, LH) 阶段相区分。a: oxygen isotope record of Wuya Cave (black curve, Tan et al, 2020), isotope simulations based on TraCE21ka (purple dots, Liu et al, 2014) and EASM circulation in TraCE21ka simulation (blue curve, 850 hPa meridional wind averaged over 110°—120°E, 27°—37°N). b: lake level of Dali (red triangles, Goldsmith et al, 2017), annual rainfall reconstructed from ^{10}Be on the Chinese Loess Plateau (brown dots and line, Baoji, Beck et al, 2018) and averaged over the NC region (107.5°—130°E, 37°—45°N) in TraCE21ka simulation (blue curve). c: percentage of reconstruction from fossil-pollen record of cool mixed tree (COMX, gray, Li et al, 2014) and temperate broad-leave deciduous tree (TBDT) in TraCE21 simulation (blue curve) over NC. d: percentage of reconstructed paleosol (brown dots and line, Li et al, 2014) and stable dune (purple dots and line, Xu et al, 2020) and upper layer soil moisture in TraCE21ka simulation (blue curve) over NC. Temporal spans of the Mid-Holocene (MH) is shaded to gray to distinguish it from the Early Holocene (EH), and Late Holocene (LH) in a—d.

图 1 全新世东亚夏季风及北方生态、环境演变的记录与模拟结果对比
Fig. 1 Contrast of evolution of Holocene East Asian summer monsoon (EASM), northern China (NC) rainfall and ecosystem in proxy records and simulation

认识的局限性也相当明显, TraCE21ka 模拟中北方生态、环境在全新世阶段的演变幅度较记录偏小, 同时没有其他模式模拟结果的对比验证。因此, 全新世东亚夏季风的演变及其生态、环境的影响依然是一个开放的问题, 需要更多模拟工作在与记录有机结合的基础上开展进一步的研究。即使如此, 对于如何理解东亚夏季风记录间的差异问题, 以及如何提高基于记录的东亚夏季风演变的反演问题, 该工作还是提出了具有参考价值的探索性思路。

参考文献

- Beck J W, Zhou W J, Li C, et al. 2018. A 550000-year record of East Asian monsoon rainfall from ^{10}Be in loess [J]. *Science*, 360(6391): 877–881.
- Bonan G B, Levis S, Sitch S, et al. 2003. A dynamic global vegetation model for use with climate models: concepts and description of simulated vegetation dynamics [J]. *Global Change Biology*, 9(11): 1543–1566.
- Chen F H, Xu Q H, Chen J H, et al. 2015. East Asian summer monsoon precipitation variability since the Last Deglaciation [J]. *Scientific Reports*, 5: 11186. DOI: 10.1038/srep11186.
- Cheng J, Ma W Y, Liu Z Y, et al. 2019. Varying sensitivity of East Asia summer monsoon circulation to temperature change since Last Glacial Maximum [J]. *Geophysical Research Letters*, 46(15): 9103–9109.
- Cheng J, Wu H B, Liu Z Y, et al. 2021. Vegetation feedback causes delayed ecosystem response to East Asian summer monsoon rainfall during the Holocene [J]. *Nature Communications*, 12: 1843. DOI: 10.1038/s41467-021-22087-2.
- Goldsmith Y, Broecker W S, Xu H, et al. 2017. Northward extent of East Asian monsoon covaries with intensity on orbital and millennial timescales [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(8): 1817–1821.
- Kutzbach J E, Guan J, He F, et al. 2020. African climate response to orbital and glacial forcing in 140000-y simulation with implications for early modern human environments [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(5): 2255–2264.
- Kutzbach J E, Street-Perrott F A. 1985. Milankovitch forcing of fluctuations in the level of tropical lakes from 18 to 0 kyr BP [J]. *Nature*, 317(6033): 130–134.
- Li Q, Wu H B, Yu Y Y, et al. 2014. Reconstructed moisture evolution of the deserts in northern China since the Last Glacial Maximum and its implications for the East Asian summer monsoon [J]. *Global and Planetary Change*, 121: 101–112.
- Liu J B, Chen J H, Zhang X J, et al. 2015. Holocene East Asian summer monsoon records in northern China and their inconsistency with Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records [J]. *Earth-Science Reviews*, 148: 194–208.
- Liu Z, Otto-Bliesner B L, He F, et al. 2009. Transient simulation of Last Deglaciation with a new mechanism for Bølling-Alerød Warming [J]. *Science*, 325(5938): 310–314.
- Liu Z Y, Wen X Y, Brady E C, et al. 2014. Chinese cave records and the East Asia summer monsoon [J]. *Quaternary Science Reviews*, 83: 115–128.
- Lu H Y, Miao X D, Zhou Y L, et al. 2005. Late Quaternary aeolian activity in the Mu Us and Otindag dune fields (north China) and lagged response to insolation forcing [J]. *Geophysical Research Letters*, 32(21): L21716. DOI: 10.1029/2005GL024560.
- Lu H Y, Yi S W, Liu Z Y, et al. 2013. Variation of East Asian monsoon precipitation during the past 21 k.y. and potential CO_2 forcing [J]. *Geology*, 41(9): 1023–1026.
- Peterse F, Prins M A, Beets C J, et al. 2011. Decoupled warming and monsoon precipitation in East Asia over the Last Deglaciation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1/2): 256–264.
- Tan L C, Li Y Z, Wang X Q, et al. 2020. Holocene monsoon change and abrupt events on the western Chinese Loess Plateau as revealed by accurately dated stalagmites [J]. *Geophysical Research Letters*, 47(21): e2020GL090273. DOI: 10.1029/2020GL090273.
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. 2005. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate [J]. *Science*, 308(5723): 854–857.
- Xu Z W, Mason J A, Xu C, et al. 2020. Critical transitions in Chinese dunes during the past 12000 years [J]. *Science Advances*, 6(9): eaay8020. DOI: 10.1126/sciadv.aay8020.