



东北亚气候过渡带近期极端“干热化”特征及其成因

蔡晴宇, 陈文*

云南省季风与极端气候灾害国际联合实验室/云南省大湄公河次区域气象灾害与气候资源重点实验室/云南大学地球科学学院大气科学系, 昆明 650500

* 通讯作者, E-mail: chenwen-dq@ynu.edu.cn

收稿日期: 2025-02-05; 收修改稿日期: 2025-05-22; 接受日期: 2025-06-16; 网络版发表日期: 2025-07-16

国家自然科学基金项目(4223060、42405042)和云南省科技厅项目(202403AP140009、202505AB350001、202302AP370003)资助

东北亚气候过渡带位于亚洲东北部的气候过渡地带, 涵盖蒙古和中国东北地区, 该区域处于季风环流与西风环流的交汇地带, 形成了东南季风气候区和西北干旱区的过渡交叉地带(Chen等, 2024). 该地区多重的过渡属性孕育了森林草原、农田、戈壁和沙漠等多样化的生态系统, 各类生态系统的气候敏感性差异显著, 具有极高的气候敏感性和生态脆弱性, 因此气候变化可能引发该区域的生态系统失衡(Chen等, 2024; You等, 2021). 近几十年来, 受西风环流与季风环流影响, 东北亚气候过渡带的极端事件频发, 例如高温热浪、寒潮、暴雪以及沙尘暴等, 造成了严重的生态和社会经济影响(Dong等, 2016; Erdenebadrakh等, 2023; Piao等, 2023). 同时, 东北亚气候过渡带的天气气候变化还与邻近的东亚季风、东亚极端热浪和干旱事件密切相关. 例如, 过渡带地区的增暖减弱了大气的层结不稳定性, 造成气旋活动的减弱, 使得贝加尔湖附近的气旋性环流和南风减弱, 从而减弱了东亚夏季风(Chen等, 2017; Chen等, 2019). 因此, 研究近期东北亚气候过渡带的气候变化既是科学研究的前沿和热点问题, 也对防灾减灾具有重要的现实意义.

全球变暖背景下, 全球陆地平均降水总体表现为

增加趋势, 但是在区域尺度上的降水变化差异明显. 研究表明, 东北亚气候过渡带的夏季降水自20世纪90年代末经历了一次明显减少过程(图1a). 此次降水减少的幅度达到了该区域平均降水量的近20%, 这一变化使得该地区成为全球降水减少最显著的区域之一(Piao等, 2017). 同时, 基于多套观测和再分析资料表明, 最近几十年东北亚地区气温经历了异常的升温过程(图1b, Cai等, 2024; Hua等, 2022; Zhang等, 2020; Zhang等, 2024). 在1986至2004年期间, 东北亚气候过渡带的升温速度是北半球陆地平均升温速度的3倍, 这使得该地区在2000年之后的气温状态超出了过去百年的变化范围(Cai等, 2024), 并且东北亚气候过渡带地区的高温热浪频率和强度均显著增强(Dong等, 2016).

东北亚气候过渡带的水汽异常辐散与此次降水减少密切相关, 特别是其南侧边界水汽通量变化对该区域水汽收支净产生了显著影响. 通过水汽通量诊断分析发现, 定常的水汽通量变化贡献了水汽收支变化的84%, 这一比例远大于瞬变波相关水汽通量贡献的16%(Piao等, 2021). 此外, 通过数值模式模拟和观测资料分析表明, 太平洋年代际振荡(IPO)的负位相和大西洋海温年代际振荡(AMO)的正位相变化, 可以通过调

中文引用格式: 蔡晴宇, 陈文. 2025. 东北亚气候过渡带近期极端“干热化”特征及其成因. 中国科学: 地球科学, 55(8): 2862–2865, doi: 10.1360/SSTe-2025-0022
英文引用格式: Cai Q, Chen W. 2025. Recent characteristics of extreme drying and warming in the northeast Asian climate transitional zone and the underlying drivers. Science China Earth Sciences, 68(8): 2742–2745, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1625-9>

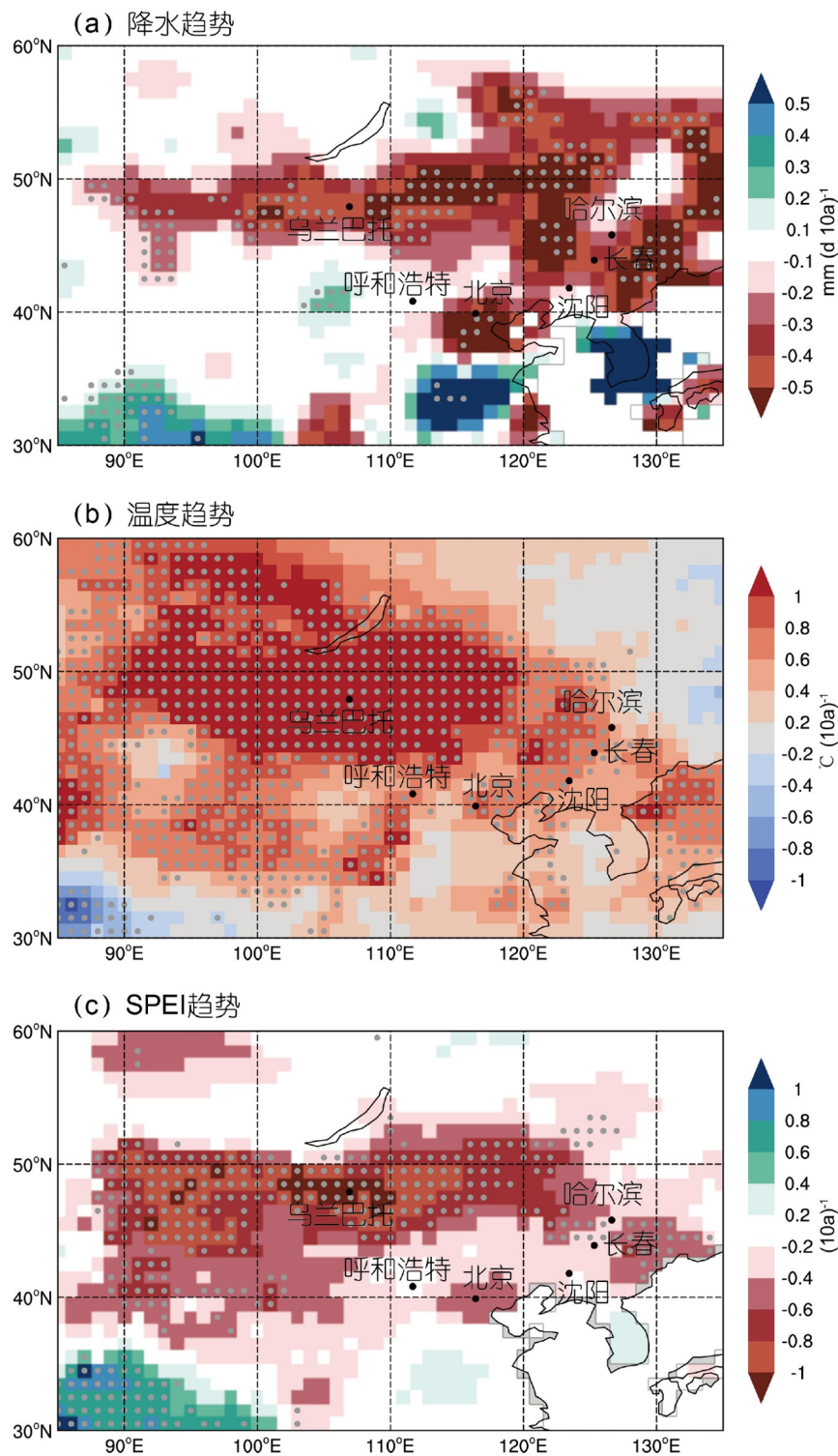


图 1 东北亚气候过渡带“干热化”特征

(a) 1986~2004年期间的夏季平均(6至8月)降水趋势(填色), 打点区域通过90%显著性检验。(b)和(c)同(a), 但为地表气温趋势和SPEI趋势。降水资料来自: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.prc1.html>。地表气温资料来自: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=download>。SPEI资料来自: <https://spei.csic.es/database.html>

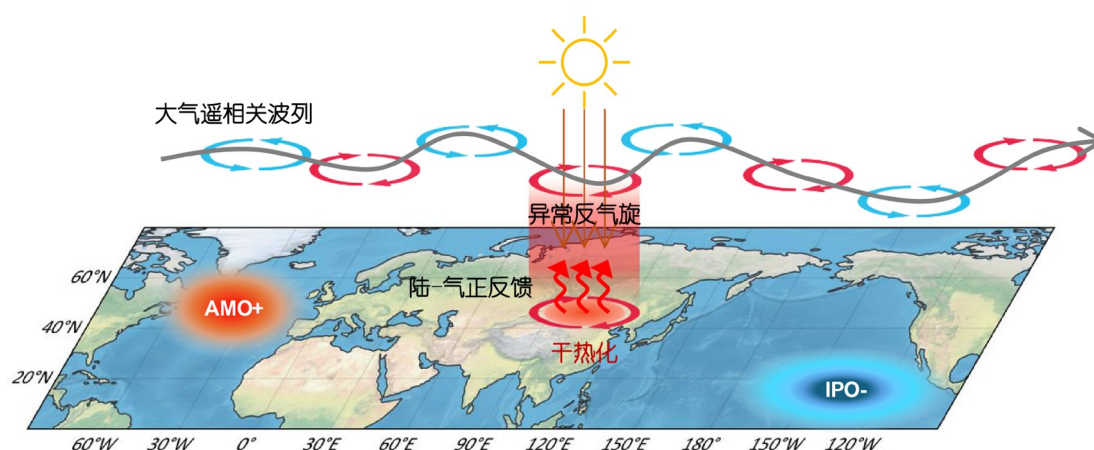


图2 东北亚气候过渡带“干热化”机制示意图

制欧亚大陆遥相关波列, 导致东北亚地区形成异常的反气旋环流, 造成了该地区的水汽经向输送负异常, 进而导致该地区降水的减少(图2; Piao等, 2017; Piao等, 2021).

针对东北亚气候过渡带的升温过程, 研究发现人类活动相关的外强迫仅能解释不到30%的升温幅度(Cai等, 2024), 气候系统内部变率的IPO和AMO的位相变化对这次东北亚气候过渡带气温飙升有重要作用. 该时段内由正转负的IPO和由负转正的AMO共同激发了中纬度大气遥相关波列, 在东北亚气候过渡带上空形成了反气旋环流趋势并通过增强向下太阳辐射和陆-气反馈加速了地表增暖, 从而造成了此次快速增温(图2; Cai等, 2024). 更多的研究发现东北亚气候过渡带的温度变化与陆-气相互作用有密切关联, 东北亚地区的高温热浪事件常常伴随着干旱和土壤湿度的降低, 变干的土壤增强了土壤的感热加热, 加剧了陆气相互作用中的非绝热升温过程, 增强了高温热浪的幅度(Yin等, 2025). 此外, 东欧和西西伯利亚地区增加的春季积雪导致了局地土壤的变湿和大气环流的异常, 异常波动信号向下游传播导致了东北亚的异常反气旋环流, 反气旋西侧的暖平流和东侧的下沉运动共同造成了东北亚局地的增暖(Sun等, 2021).

东北亚气候过渡带近期显著的降水减少和气温升高加剧了区域性的“干热化”现象, 引发了罕见的严重干旱(图1c; Hessel等, 2018; Wang等, 2023). 东北亚气候过渡带的干旱已造成了生态系统生产力的显著下降, 20世纪90年代以来干旱对生产力的风险相比之前

增加了10%(Nandintsetseg等, 2021). 其中, 东北亚气候过渡带的森林区域对温度的变化更加敏感, 随着温度升高森林区域表现为植被增长的正响应; 与之相对, 草原区域受到降水的影响显著, 降水减少使得而草原区域经历退化. 总体而言, 在“干热化”的背景下, 归一化植被指数在东北亚气候过渡带的草原区域表现为负趋势, 而森林区域则为正趋势(You等, 2021). 同时, 受气候变化和人类活动的影响, 过渡带地区的荒漠和稀疏植被地区也经历了不同程度的植被退化(Kang等, 2020). 因此, 未来应积极实施气候变化的适应和应对措施, 比如加强生态系统保护措施和采取有效的干旱缓解策略, 以减轻人类活动和气候变化对该区域生态系统的影响.

基于世界气候研究计划(WCRP)第六次国际耦合模式比较计划(CMIP6)的模式预估结果, 随着全球变暖, 未来20~30年东北亚气候过渡带地区表现为降水增加和气温升高的趋势(Cai等, 2024; Piao等, 2021). 其中, 降水增加的趋势主要受到垂直水汽输送的影响. CMIP6模式结果表明, 在SSP585情景下, 未来20~30年东亚地区陆地热带与中高纬地区的温度梯度加大, 这将导致东亚盛行南风进一步增强并在过渡带地区形成异常辐合, 从而增强局地的垂直上升活动进而增加降水(Piao等, 2021). 然而, 气候模式的近期预估(2021~2040年)结果仍存在较大不确定性, 其不确定性主要来源之一是气候系统内部变率(Cai等, 2024).

值得注意的是, 东北亚气候过渡带的气候及生态系统对不同外强迫因子(温室气体、气溶胶和土地利

用等)以及气候系统内部变率表现出差异化的响应特征, 并且这种响应很大程度上受研究时间段和时间尺度的调控. 未来需要基于数值模拟手段深入开展东北亚气候过渡带气候及生态系统变化的归因、影响及未来预估的研究, 为决策者制定气候变化相关政策和防灾减灾提供科学支撑和可靠依据. 待开展深入研究的方向包括: (1)研究东北亚气候过渡带生态系统对“干热化”的响应机制和反馈作用; (2)探究东北亚气候过渡带“干热化”对东亚季风区气候格局的影响; (3)评估东北亚气候过渡带的气候及生态系统变化未来预估结果的不确定性来源, 并在未来不同情景下对预估结果进行合理约束.

参考文献

- Cai Q, Chen W, Chen S, Xie S P, Piao J, Ma T, Lan X. 2024. Recent pronounced warming on the Mongolian Plateau boosted by internal climate variability. *Nat Geosci*, 17: 181–188
- Chen H, Teng F, Zhang W, Liao H. 2017. Impacts of anomalous midlatitude cyclone activity over East Asia during summer on the decadal mode of East Asian summer monsoon and its possible mechanism. *J Clim*, 30: 739–753
- Chen H, Zhan W, Zhou B, Teng F, Zhang J, Zhou Y. 2019. Impact of nonuniform land surface warming on summer anomalous extra-tropical cyclone activity over East Asia. *JGR Atmos*, 124: 10306–10320
- Chen W, Piao J, Chen S, Wang L, Zhao W, Wang Z, Wang Q. 2024. Multi-scale variations and future projections of dry-wet conditions over the monsoon transitional zone in East Asia: A review. *Fundamental Res*, doi: 10.1016/j.fmre.2024.01.023
- Dong B, Sutton R T, Chen W, Liu X, Lu R, Sun Y. 2016. Abrupt summer warming and changes in temperature extremes over Northeast Asia since the mid-1990s: Drivers and physical processes. *Adv Atmos Sci*, 33: 1005–1023
- Erdenebadrakh M, Shinoda M, Nandintsetseg B. 2023. Effects of cold-season climate hazards on livestock health and mortality in Mongolia. *Int J Disaster Risk Reduction*, 90: 103658
- Hua W, Dai A, Chen H. 2022. Little influence of Asian anthropogenic aerosols on summer temperature in central East Asia since 1960. *Geophys Res Lett*, 49: e2022GL097946
- Hessl A E, Anchukaitis K J, Jelsema C, Cook B, Byambasuren O, Leland C, Nachin B, Pederson N, Tian H, Hayles L A. 2018. Past and future drought in Mongolia. *Sci Adv*, 4: e1701832
- Kang W, Kang S, Liu S, Han Y. 2020. Assessing the degree of land degradation and rehabilitation in the Northeast Asia dryland region using net primary productivity and water use efficiency. *Land Degrad Dev*, 31: 816–827
- Nandintsetseg B, Boldgiv B, Chang J, Ciais P, Davaanyam E, Batbold A, Bat-Oyun T, Stenseth N C. 2021. Risk and vulnerability of Mongolian grasslands under climate change. *Environ Res Lett*, 16: 034035
- Piao J, Chen W, Chen S. 2021. Water vapour transport changes associated with the interdecadal decrease in the summer rainfall over Northeast Asia around the late-1990s. *Intl J Climatology*, 41: E1469
- Piao J, Chen W, Chen S, Gong H, Wang L. 2021. Mean states and future projections of precipitation over the monsoon transitional zone in China in CMIP5 and CMIP6 models. *Climatic Change*, 169: 35
- Piao J, Chen W, Wei K, Cai Q, Zhu X, Du Z. 2023. Increased sandstorm frequency in North China in 2023: Climate change reflection on the Mongolian plateau. *Innovation*, 4: 100497
- Piao J, Chen W, Wei K, Liu Y, Graf H F, Ahn J B, Pogoreltsev A. 2017. An abrupt rainfall decrease over the Asian inland plateau region around 1999 and the possible underlying mechanism. *Adv Atmos Sci*, 34: 456–468
- Sun Y, Chen H, Zhu S, Zhang J, Wei J. 2021. Influence of the Eurasian spring snowmelt on summer land surface warming over northeast Asia and its associated mechanism. *J Clim*, 34: 4851–4869
- Wang L, Huang G, Chen W, Wang T. 2023. Super drought under global warming: concept, monitoring index, and validation. *Bull Am Meteorol Soc*, 104: E943–E969
- Yin Z, Dong B, Yang S, Wei W. 2025. Soil moisture–atmosphere coupling amplifies the change in extreme heat in inner East Asia under rapid summer warming. *Environ Res Lett*, 20: 014022
- You G, Liu B, Zou C, Li H, McKenzie S, He Y, Gao J, Jia X, Altaf Arain M, Wang S, Wang Z, Xia X, Xu W. 2021. Sensitivity of vegetation dynamics to climate variability in a forest-steppe transition ecozone, north-eastern Inner Mongolia, China. *Ecol Indicators*, 120: 106833
- Zhang K, Zuo Z, Suarez-Gutierrez L, Bu L. 2024. The significant influence of the Atlantic multidecadal variability to the abrupt warming in Northeast Asia in the 1990s. *npj Clim Atmos Sci*, 7: 28
- Zhang P, Jeong J H, Yoon J H, Kim H, Wang S Y S, Linderholm H W, Fang K, Wu X, Chen D. 2020. Abrupt shift to hotter and drier climate over inner East Asia beyond the tipping point. *Science*, 370: 1095–1099

(编委: 吕健)