

# 气候变暖背景下加剧的陆-气耦合驱动热浪热点区西迁

黄建平

兰州大学大气科学学院, 西部生态安全省部共建协同创新中心, 兰州 730000

E-mail: [hjp@lzu.edu.cn](mailto:hjp@lzu.edu.cn)

## Exacerbated land-air coupling under global warming drives the westward shift of heatwave hotspots

Jianping Huang

Collaborative Innovation Center for Western Ecological Safety, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

E-mail: [hjp@lzu.edu.cn](mailto:hjp@lzu.edu.cn)

doi: [10.1360/CSB-2025-0656](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0656)

工业革命以来随着人为温室气体排放的增加, 北半球夏季热浪愈加频发<sup>[1,2]</sup>, 同时土壤也出现明显的变干趋势<sup>[3]</sup>, 热浪频发和土壤变干并发这一特征在北半球中纬度的北美西部、东欧和东北亚尤为显著<sup>[4-9]</sup>, 给当地居民和生态系统的敏感性和适应性带来了巨大风险<sup>[10-12]</sup>. 过去研究主要强调了区域尺度上土壤湿度亏缺对热浪强度的局地放大作用<sup>[7,13,14]</sup>, 而很少从全球视野来深入探讨土壤变干与热浪之间的物理联系.

日前, Zhang等人<sup>[15]</sup>在*Nature Climate Change*上的一项研究, 利用伯克利地球地表气温观测数据(BEST)和欧洲中期天气预报中心第五代大气再分析资料(ERA5)对20世纪80年代以来北半球热浪频发中心(热点区)的空间变化特征进行了分析. 该研究表明, 北半球中纬度的夏季热浪热点区在20世纪90年代末期发生了一次系统性西移, 从北美东部、中亚和东西伯利亚整体往西移动到北美西部、东欧和东北亚. 热浪中心空间格局的这种变化可以被中纬度强振幅行星5波的系统性西移所解释: 在20世纪90年代末期, 强振幅行星5波的“锁相”(即至少有50%的行星波发生在其四分之一波长的区间内)位置向西偏移了约7°, 这导致原位于北美东部、中亚和东西伯利亚的陆地高压西移到了北美西部、东欧和东北亚上空, 使得上述三地成为新的热浪热点区.

该项研究进一步着重探讨了土壤湿度-大气耦合对中纬度热浪热点区空间分布变化的影响. 在全球变暖的作用下, 北美西部、东欧和东北亚的土壤变干趋势显著, 同时对应着

20世纪90年代末上述三地的土壤湿度-大气耦合强度明显增强. 统计结果表明, 当北美西部、东欧和东北亚三地前期陆-气耦合强度偏强时, 20世纪90年代末期之后强振幅行星5波的陆地高压在上述三地发生的概率是前期陆-气耦合强度偏弱时的39倍, 这一倍数远远大于20世纪90年代末期之前的4倍. 因此, 土壤湿度-大气耦合在20世纪90年代末期之后对大气环流的影响能力显著增强了. Zhang等人<sup>[15]</sup>进一步利用数值模拟比较了土壤湿度-大气耦合和解耦状态下强振幅行星5波的空间分布情况. 结果表明, 在土壤湿度-大气耦合的情况下, 强振幅行星5波的“锁相”位置相比解耦情况下更易偏西, 其在西位相“锁相”的概率为85.4%, 而在解耦情况下, 这一概率仅为4.7%. 因此, 土壤湿度-大气耦合是驱动强振幅行星5波“锁相”位置西移的必要条件, 其将几乎不可能发生( $P=4.7\%$ )的事件转变为了必然发生( $P=85.4\%$ ).

该项研究表明, 增暖引起的土壤湿度与大气之间的“干-热”正反馈是强振幅行星5波“锁相”位置西移的主要驱动机制(图1). 当高压扰动位于北美西部、东欧和东北亚上空时, 亏缺的土壤湿度会导致地表感热通量增强, 并且引起地表气温升高, 形成“干-热”正反馈. 这一过程一方面直接通过加剧高压系统下的热量累计和质量堆积加强局地高压系统; 另一方面, 加热的近地表空气会尝试上升, 但会被高层高压系统阻挡回地面, 从而通过绝热加热进一步加强局地高压系统. 因此, 在增强的土壤湿度-大气耦合作用下, 扰动更易发展为强振幅行星5波, 导致“锁相”位置西移. 最终, 陆地高压下的高温

引用格式: 黄建平. 气候变暖背景下加剧的陆-气耦合驱动热浪热点区西迁. 科学通报, 2025, 70: 4616-4618

Huang J. Exacerbated land-air coupling under global warming drives the westward shift of heatwave hotspots (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 4616-4618, doi: [10.1360/CSB-2025-0656](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0656)

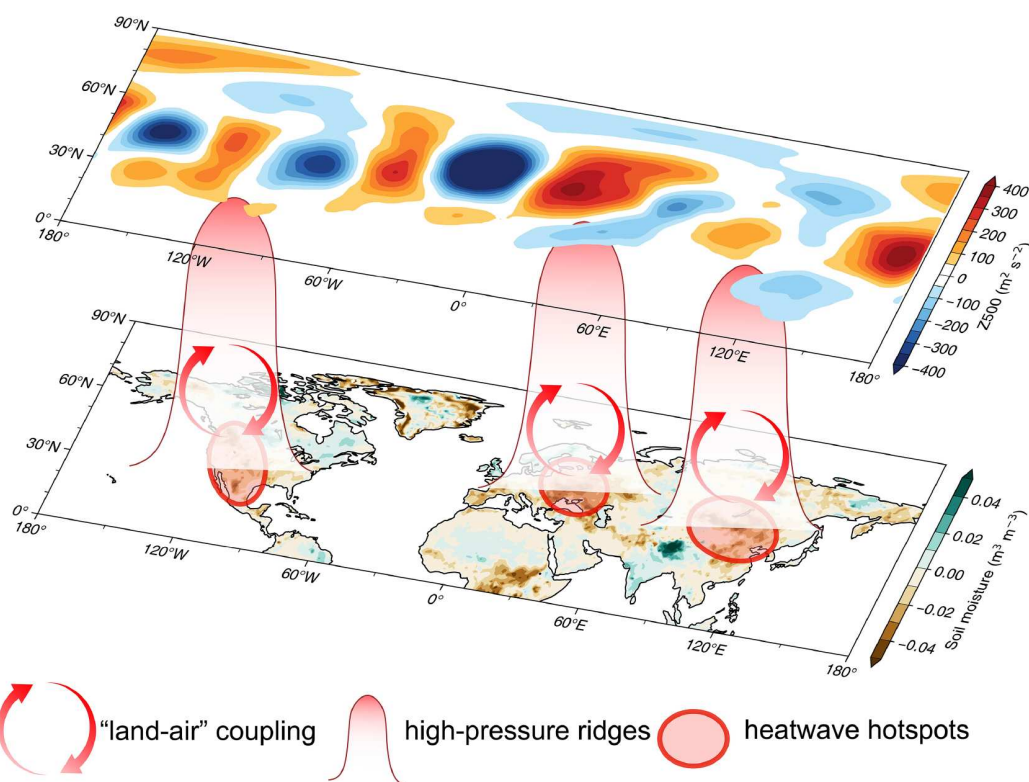


图1 土壤湿度-大气耦合通过“干-热”反馈影响强振幅行星5波机制示意图<sup>[15]</sup>

**Figure 1** Schematic diagram of the mechanism of high-amplitude planetary wave 5 influenced by soil moisture-air coupling through “dry-hot” feedbacks<sup>[15]</sup>

异常也西移到北美西部、东欧和东北亚，引起三地极端高温频发。

传统理论认为，土壤湿度改变只是对于大气环流变化的一种被动反馈。该研究指出，在全球变暖作用下，中纬度多区域增强的土壤湿度-大气耦合作用可以主动改变环中纬度大气环流，引起北半球中纬度的极端高温热浪空间格局的改变。这一结论改变了学界对土壤湿度在气候系统中扮演角色的传统认知。在近期未来，全球变暖持续加剧的情况下，陆-气耦

合作用将足以将热浪热点区维持在北美西部、东欧和东北亚。该研究结果推动相关学者重新认识陆-气相互作用在气候系统中的重要性，同时对于当地政府制定政策以应对极端热浪带来的农作物和人体健康风险具有重要意义。值得注意的是，该研究强调了土壤湿度-大气耦合对中纬度大尺度环流及热浪不可忽视的影响。而为了更全面地认识陆面系统在其中的作用机制，后续工作需要进一步探究土地利用和土地覆盖、植被变化等其他陆面因子的影响。

**致谢** 感谢甘肃省拔尖领军人才培养扶持资金和兰州市人才工作专项资金资助。

## 参考文献

- Christidis N, Jones G S, Stott P A. Dramatically increasing chance of extremely hot summers since the 2003 European heatwave. *Nat Clim Change*, 2015, 5: 46–50
- Coumou D, Rahmstorf S. A decade of weather extremes. *Nat Clim Change*, 2012, 2: 491–496
- Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nat Clim Change*, 2013, 3: 52–58
- Smoyer K E. A comparative analysis of heat waves and associated mortality in St. Louis, Missouri—1980 and 1995. *Int J BioMeteor*, 1998, 42: 44–50
- Li X, Mann M E, Wehner M F, et al. Role of atmospheric resonance and land-atmosphere feedbacks as a precursor to the June 2021 Pacific

- Northwest Heat Dome event. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 2024, 121: e2315330121
- 6 Philip S Y, Kew S F, van Oldenborgh G J, et al. Rapid attribution analysis of the extraordinary heat wave on the Pacific coast of the US and Canada in June 2021. [Earth Syst Dynam](#), 2022, 13: 1689–1713
- 7 Zhang X, Zhou T, Zhang W, et al. Increased impact of heat domes on 2021-like heat extremes in North America under global warming. [Nat Commun](#), 2023, 14: 1690
- 8 Barriopedro D, Fischer E M, Luterbacher J, et al. The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. [Science](#), 2011, 332: 220–224
- 9 Ren L, Zhou T, Zhang W. Attribution of the record-breaking heat event over Northeast Asia in summer 2018: the role of circulation. [Environ Res Lett](#), 2020, 15: 054018
- 10 Tuholske C, Caylor K, Funk C, et al. Global urban population exposure to extreme heat. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 2021, 118: e2024792118
- 11 Chen X, Cui X, Gao J. Differentiated agricultural sensitivity and adaptability to rising temperatures across regions and sectors in China. [J Environ Economics Manage](#), 2023, 119: 102801
- 12 Chen M, Chen L, Zhou Y, et al. Rising vulnerability of compound risk inequality to ageing and extreme heatwave exposure in global cities. [npj Urban Sustain](#), 2023, 3: 38
- 13 Zhang P, Jeong J H, Yoon J H, et al. Abrupt shift to hotter and drier climate over inner East Asia beyond the tipping point. [Science](#), 2020, 370: 1095–1099
- 14 Fischer E M, Seneviratne S I, Lüthi D, et al. Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves. [Geophys Res Lett](#), 2007, 34: 2006GL029068
- 15 Zhang K, Zuo Z, Mei W, et al. A westward shift of heatwave hotspots caused by warming-enhanced land–air coupling. [Nat Clim Change](#), 2025, 15: 546–553