

林火规模加剧火后地表增温

赵洪飞¹, 赵杰², 岳超^{3*}

1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100;

2. 临沂大学资源环境学院, 临沂 276000;

3. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

* 联系人, E-mail: chaoyue@ms.iswc.ac.cn

Forest fire size amplifies postfire land surface warming

Hongfei Zhao¹, Jie Zhao² & Chao Yue^{3*}

¹ College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

² College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi 276000, China;

³ State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

* Corresponding author, E-mail: chaoyue@ms.iswc.ac.cn

doi: [10.1360/TB-2024-1056](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1056)

近半个世纪以来,人为温室气体排放导致的气候变暖使得极端野火天气显著增加,全球森林野火变得更加频繁,并且单次野火事件的持续时间更长、燃烧面积更大^[1-3]。例如,加拿大、美国和澳大利亚单次森林野火事件的面积在过去几十年里翻倍甚至3倍增长^[4,5]。森林野火可以通过改变陆地-大气界面的碳、氮、气溶胶、水和能量通量对生物地球化学循环和生物地球物理过程施加影响,从而产生气候反馈^[6,7]。然而,尽管林火规模不断扩大,极端大火对地表气候的影响及其对土地管理政策的意义却鲜有关注。

传统观点认为,森林野火的气候反馈作用取决于总过火面积(=林火数量×斑块面积),总过火面积越大,气候反馈也就越强。然而,就单位面积而言,不同林火规模(即林火斑块面积)对生态系统和气候的影响是否具有差异仍然未知。如果存在差异,则意味着即使总过火面积保持不变,但如果单次林火事件的面积发生变化(即林火斑块面积组成发生变化),森林野火的气候反馈仍将不同。

本研究基于2003~2016年的全球森林野火斑数据集、地表辐射温度(T)、地表反照率、生态系统蒸散发和入射短波辐射等多种遥感和气候数据,研究了不同规模林火发生后的1~14年间火后地表温度变化以及伴随的地表能量平衡变化。此外,还基于林火行为、火辐射能量(FRP)、叶面积指数(LAI)和火后森林损失等数据,研究了林火强度和森林破坏程度随林火规模的变化。

结果显示,在北半球中高纬40°以北的北方温带和寒带森林,林火过后夏季地表温度升高,并且升温幅度和林火规模

的对数呈线性增加的关系,即林火规模对夏季地表升温具有放大效应。林火规模每增加1倍,火后地表升温幅度增加 0.13 ± 0.01 K,为研究区域火后地表平均升温幅度的22%。换言之,林火过后,被燃烧的森林斑块与周边未着火森林相比会形成显著的热岛,斑块越大,热岛效应越强。研究还发现,尽管其强度有所衰减,林火规模对火后地表升温的放大效应持续数十年之久(图1)。

火后夏季地表升温受地表能量平衡过程的变化驱动,由辐射效应和非辐射效应共同决定。一方面,火后燃烧灰烬和黑碳堆积于地表,导致反照率下降,地表吸收的太阳短波辐射能量增加,这是导致升温的辐射效应。另一方面,林火导致树木死亡,生态系统蒸散发随之下降,潜热通量降低,意味着地表吸收的热辐射更少以潜热形式释放回低层大气,称为非辐射升温效应。

林火规模对火后地表升温的放大作用是由“直接规模效应”和“林火强度效应”共同决定的。“直接规模效应”与火后地表的景观异质性密切相关:在同样的过火面积下,一场大型林火与众多分散小型林火相比,大型林火过后地表景观均一性更高,导致地表粗糙度下降,空气动力学阻抗增加,因此地表和低层大气的水热通量降低,地表吸收的热辐射更少以感热和潜热的形式被带离地表,由此导致更强的非辐射升温效应。“林火强度效应”是指大型林火通常发生在极端高温、少雨、长期干旱的气象条件下,因此林火强度(由火辐射能量表征)随林火规模增大而增加。其间伴随着森林破坏程度的增加,表现为火后树木死亡率和叶面积指数下降幅度均随林火规模增大而增加。更高

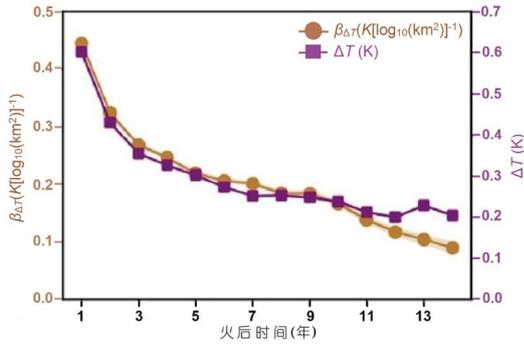


图 1 夏季火后地表升温及林火规模的放大效应^[8]. ΔT 为火后1~14年夏季(6~8月)地表辐射温度变化; $\beta_{\Delta T}$ 为在研究区(40°~70°N森林)应用线性回归模型($\Delta T = \alpha + \beta_{\Delta T} \times \log_{10}[\text{fire size}]$)所得到的斜率,用于量化林火规模对火后地表升温的放大效应
Figure 1 Postfire surface radiometric warming in summer and its amplification by fire size. Postfire surface radiometric temperature change (ΔT) in summer (June–August) is shown for 1–14 years after fire for northern temperate and boreal forests of 40°–70°N. The slope $\beta_{\Delta T}$ is derived by fitting a linear regression model ($\Delta T = \alpha + \beta_{\Delta T} \times \log_{10}[\text{fire size}]$) using all fire patches across the study region, which indicates the amplification effect of fire size on ΔT

的林火强度意味着火后地表变得更黑,反照率下降更多;更高的树木死亡率意味着生态系统蒸发下降更多——这些因素促使辐射和非辐射致暖效应均随林火强度增加而增加。

林火规模对野火气候反馈的放大效应通过影响一系列生态和气候过程进一步加剧气候变暖,并影响未来野火风险(图2)。极端大火导致的地表升温 and 土壤水分下降影响火后森林更新(或导致更新失败)和树种组成,这些过程将影响局地林火周期(图2(d))。对极端森林大火而言,火后地表升温的热岛效应并不局限于燃烧斑块:受临近效应影响,大型林火周边的未着火森林也表现出显著的地表升温。叠加过火区长达10余年的热岛效应和蒸散发下降,可导致区域云量减少,从而加剧干旱和热浪的发生(图2(e))。在全球尺度上,极端森林大火意味着更多的CO₂排放(包括直接燃烧排放(图2(b))、火后死木分解排放(图2(c))和永久冻土融化后土壤有机碳的释放(图2(e)))。上述多种过程表明极端大火将加剧全球变暖,从而可能导致更多的极端大火,造成恶性循环。

如何减缓极端大火带来的气候风险? 本研究发现,在北半球40°~70°N森林区,火后夏季地表升温及其随林火规模的放大效应随着落叶阔叶林比例的增加而降低,这与阔叶树种

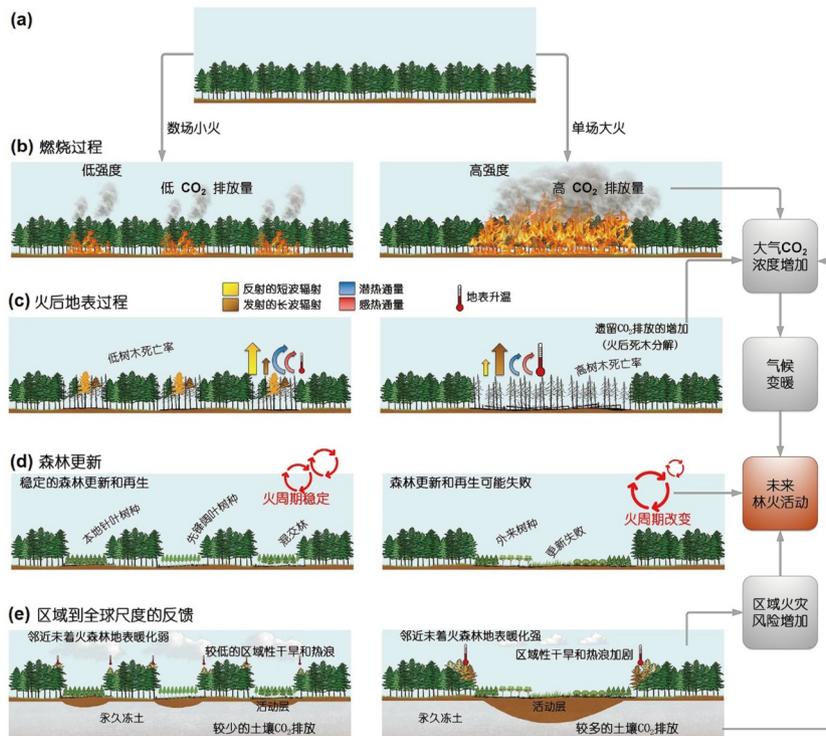


图 2 林火规模对未来气候和野火风险的影响^[8]. (a) 代表林火发生前的森林状态(以北方常绿针叶林为例). (b~e) 分别表示林火规模对二氧化碳排放、火后生物地球物理过程、森林更新、以及区域-全球尺度气候反馈的影响. 左侧和右侧图片分别表示在相同过火面积下,发生多场分散小火和一场大火的情景
Figure 2 Implications of increasing fire size on future climate and fire Activity. (a) Represents the pre-fire forest state (taking the boreal evergreen needleleaf forests as an example). (b–e) Respectively indicate the impact of forest fire size on CO₂ emissions (b), postfire biogeophysical processes (c), stand regeneration (d) and regional- to global-scale climate feedback loops (e). The left and right figures represent scenarios of several small fires and a single large fire occurring over the same burnt area

具有较低的火灾脆弱性相一致。因此，林火规模对火后地表升温的放大效应在针叶林主导的北美和亚洲东部寒带森林最为明显，而在阔叶林或针阔混交林占比较高的东欧、西西伯利亚、中西伯利亚和西伯利亚东南部，火后升温和林火规模的放大效应较弱或不存在。通常而言，阔叶树种比针叶树种更不容易着火，并且其更高的反照率会带来辐射降温效应。因此，在北美适当增加阔叶树种的比例可以帮助减缓气候变暖和森林野火的发生；而在亚欧寒带森林，这一方案的适当

性需要进一步研究和论证。

本研究首次从林火规模这一独特视角，揭示了极端森林大火对生态系统破坏性、林火碳排放和地表气候反馈的放大效应，并对可能存在的“极端大火频发-气候变暖-更多极端大火”的恶性循环提出了警示，为全面和深入认识林火对地球系统和气候过程的影响开辟了新视角，有助于提高我们预测未来气候变化以及极端大火如何响应全球变暖的能力。相关研究结果发表在*Nature*^[8]。

推荐阅读文献

- 1 Jain P, Castellanos-Acuna D, Coogan S C P, et al. Observed increases in extreme fire weather driven by atmospheric humidity and temperature. *Nat Clim Chang*, 2022, 12: 63–70
- 2 Scholten R C, Jandt R, Miller E A, et al. Overwintering fires in boreal forests. *Nature*, 2021, 593: 399–404
- 3 Dello K. Prepare for larger, longer wildfires. *Nature*, 2017, doi: 10.1038/nature.2017.22821
- 4 Hanes C C, Wang X, Jain P, et al. Fire-regime changes in Canada over the last half century. *Can J For Res*, 2019, 49: 256–269
- 5 Dennison P E, Brewer S C, Arnold J D, et al. Large wildfire trends in the western United States, 1984–2011. *Geophys Res Lett*, 2014, 41: 2928–2933
- 6 Bonan G B. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 2008, 320: 1444–1449
- 7 Zhao J, Wang L, Hou X, et al. Fire regime impacts on postfire diurnal land surface temperature change over North American boreal forest. *J Geophys Res Atmos*, 2021, 126: e2021JD035589
- 8 Zhao J, Yue C, Wang J, et al. Forest fire size amplifies postfire land surface warming. *Nature*, 2024, 633: 828–834