

DOI: 10.5846/stxb202210142923

魏芳莉, 王帅, 傅伯杰. 变化环境下火干扰研究进展. 生态学报, 2023, 43(1): 1-8.

Wei F L, Wang S, Fu B J. Research progress on fire disturbance in a changing environment. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 1-8.

## 变化环境下火干扰研究进展

魏芳莉<sup>1</sup>, 王 帅<sup>2</sup>, 傅伯杰<sup>1,\*</sup>

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

**摘要:** 火是地球系统的重要过程, 也是一种剧烈的环境干扰因素。火是生态系统变化的驱动力和催化剂, 调节着生态系统的结构和功能, 同时反馈给气候系统。近年来, 世界多个国家相继爆发了历史上罕见的极端火事件, 使得火干扰、气候变化和人类活动之间的相互作用关系得到了空前的关注。主要从 3 个方面回顾了变化环境下火干扰研究的进展, 包括 (1) 火干扰的时空格局; (2) 火干扰的驱动机制; (3) 火干扰的生态效应。概括起来, 遥感技术的发展使得火监测精度不断提高, 对火时空格局的刻画由过去侧重火燃烧面积单一因素转向具有多重属性的火干扰体系。气候变化和人类活动共同决定着火干扰的分布格局、频率和强度, 考虑气候的季节性能够提高火干扰的预测能力。火干扰调节着生态系统的草木平衡, 对于生物多样性和生境的维持非常重要。此外, 火干扰通过生物质燃烧释放的大量温室气体影响大气组成和空气质量, 同时通过改变地表状况和陆-气相互作用来影响气候系统。正确理解气候-植被-火之间的相互作用和反馈机制有助于未来火干扰体系的预测。随着高温、大风、干旱等极端气候事件增多, 未来全球大部分区域火发生的风险增加, 但是人类活动可能会使火和气候之间的关系发生解耦。可持续的火管理应充分结合生态学知识和土著居民火文化, 以保护生物多样性、维持重要生态系统服务和减缓气候变化为目标, 减少极端火灾的风险。

**关键词:** 变化环境; 火干扰; 时空格局; 驱动机制; 生态效应

## Research progress on fire disturbance in a changing environment

WEI Fangli<sup>1</sup>, WANG Shuai<sup>2</sup>, FU Bojie<sup>1,\*</sup>

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 State Key Laboratory of Earth Surface and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract:** Fire is an essential component of the Earth system and a severe environmental disturbance factor. Fire is an important driver and catalyst for ecosystem changes, which regulates the structure and function of the ecosystem and provides feedback to regional and global climate systems. In recent years, extreme fire events that are rare in history have erupted in many countries around the world, drawing unprecedented attention to the interaction between fire disturbance, climate change, and human activities. This paper mainly reviews the progress of fire disturbance research in a changing environment from three aspects, including (1) spatiotemporal patterns of fire disturbance; (2) driving mechanisms of fire disturbance; (3) ecological effects of fire disturbance. In summary, state-of-the-art remote sensing technology has greatly improved the accuracy of fire monitoring, and the portrayal of the spatiotemporal pattern of fire has shifted from focusing on a single factor of fire burned area to the fire regime with multiple attributes. Climate change and human activities jointly determine the pattern, frequency, and intensity of fire disturbance. Taking into account the seasonality of climate can improve the prediction ability of the global fire system. Fires play an important role in regulating the competition between

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (41991230)

**收稿日期:** 2022-10-14; **采用日期:** 2023-01-05

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bfu@cees.ac.cn

herbaceous and woody vegetation and thus are very important for biodiversity and habitat maintenance. In addition, fire disturbance affects the atmospheric composition and air quality through the release of large amounts of greenhouse gases from biomass burning, while impacting the climate system by altering land surface conditions and affecting land-atmosphere interactions. A better understanding of the interactions and feedback of climate-vegetation-fire can facilitate the prediction of fire regimes. In the future climate scenario, increases in extreme climate events, such as high temperatures, strong winds, and droughts, create a fire-prone environment. Although an increased risk of fire disturbances in most parts of the world, human activity may decouple the relationship between fire and climate. Sustainable fire management should fully integrate ecological knowledge and indigenous fire culture to reduce the risk of extreme fires, with the goal of protecting biodiversity, maintaining vital ecosystem services, and mitigating climate change.

**Key Words:** changing environment; fire disturbance; spatiotemporal pattern; driving mechanism; ecological effect

火是地球系统的重要过程<sup>[1]</sup>,是生态系统变化的驱动力和催化剂,影响着生态系统的分布格局和演化动态,对生物多样性以及生物地球化学循环有着广泛的影响<sup>[1-3]</sup>。火也是一种剧烈的环境干扰因素,它烧毁地表植被并重启群落演替过程,在调节草木竞争中扮演着重要角色<sup>[4-6]</sup>。火干扰通过改变地表状况(粗糙度、反射率、蒸散发)和陆-气相互作用影响地表能量平衡,最终反馈给气候系统<sup>[7-9]</sup>。此外,火干扰释放大量的温室气体和颗粒物加剧了空气污染,对人体健康、生命安全和财富产生严重威胁。全球每年火烧直接向大气释放 2—3Pg (1Pg = 10<sup>15</sup>g) 的碳,显著促进大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高<sup>[10]</sup>。在气候变化和人类活动的共同影响下,全球火干扰体系发生了不可忽视的变化。认识和把握变化环境下火的时空格局、驱动机制及其生态效应对于理解生态系统演化和全球气候变化具有重要意义<sup>[1,4,9,11-13]</sup>。

近年来,美国、加拿大、俄罗斯、希腊、巴西、澳大利亚、智利、葡萄牙等国家相继爆发了历史上罕见的森林大火,使得火干扰、气候变化和人类活动之间的相互作用关系得到空前关注<sup>[14]</sup>。未来气候情景下,高温、大风、干旱等极端气候事件增多,产生了一个火干扰易发环境,全球大部分区域火干扰发生的风险增加<sup>[15-16]</sup>。人类活动通常有意或无意地提供着火源来增加火的频率。人类也通过对生态系统的管理,如农田扩张和道路建设等增加景观破碎化,抑制火的发生和传播<sup>[17-18]</sup>。此外,人类通过火管理,如计划火烧和建设绿色防火带等,降低不可控的火风险。气候和人为因素的复杂关联如何在大尺度上影响火动态仍不清楚,增加了全球变化背景下未来火趋势预测的不确定性。

在上述背景下,国际火干扰研究在火的监测、影响和管理等方面取得了显著进展。本文着重从火干扰的时空格局、驱动机制和生态效应 3 个方面,对变化环境下火干扰研究进行了综述,进而促进火干扰生态学理论的发展。此外,本文也讨论了未来火变化趋势的不确定性以及火适应性管理的重要性。本文不仅有助于深化理解人类世变化环境下气候-植被-火之间的相互作用和反馈机制,也可以为火干扰预测和极端大火防治提供科学依据。

## 1 火发生的时空格局

### 1.1 火干扰体系

火长期、广泛地作用于陆地表面大多数生态系统,并成为许多植被类型和物种赖以存续的关键过程,重塑生态系统的群落组成和结构<sup>[1,4]</sup>。火燃烧面积和火干扰体系构成了火监测评估的两大主题,分别体现了全球-区域尺度和景观尺度火相关研究的关注焦点。火干扰体系包括火的空间分布(燃烧面积、大小),时间属性(传播速度、持续时间、季节性、频率)及其行为特征(强度、烈度)等。近年来,火相关研究由过去侧重火燃烧面积单一因素,转向运用多重属性来定量刻画火干扰体系的时空轨迹。

自 20 世纪 90 年代后期,随着遥感火监测技术的发展,火的空间定位、动态变化、驱动机制及影响评估主要依赖于卫星遥感手段<sup>[19]</sup>。MODIS 火燃烧面积产品(MCD45A1 和 MCD64A1)、阿姆斯特丹自由大学建立的

全球 0.25°分辨率的火燃烧面积、各种火排放气体和颗粒物产品(GFED4s)得到广泛的应用<sup>[20-21]</sup>。相关学者基于卫星遥感的火燃烧面积数据,发展了火干扰体系的多重指标,可以跟踪单次火的演化动态,确定点火的时间和位置、火的大小和持续时间、以及日扩张速度、火线长度、蔓延速度和方向等,因此能更好地刻画火干扰的行为特征和演化轨迹<sup>[22-23]</sup>。火干扰体系指标的建立通常基于以下思路:火燃烧面积( $\text{km}^2/\text{d}$ )等于火大小( $\text{km}^2$ )和着火源( $\text{d}^{-1}$ )的乘积;火大小等于火持续时间(day)和日扩张速度( $\text{km}^2/\text{d}$ )的乘积;日扩张速度等于火蔓延速度( $\text{km}/\text{d}$ )、火线长度(km)及蔓延方向( $^\circ$ )的乘积。

## 1.2 时空格局

火干扰主要分布在干湿季分明的区域:湿季燃料累积、干季燃料变干,进而促进火的发生。全球尺度上,火的大小和着火源的空间格局明显不同且两者呈负相关<sup>[22]</sup>。大火多分布在澳大利亚、非洲和南美洲,而亚洲和欧洲多是小火。非洲火燃烧面积占全球的 70%,主要是由于密集的着火源。在生产力高的热带草地和北方森林,由于湿度和燃料负荷较大,火扩张速率低,持续时间长,火的大小和火燃烧面积主要受火持续时间的控制。在半干旱的草地和灌丛地,火持续时间和火的大小主要受燃料负荷和连通性的限制,火持续时间较短,而火蔓延速率大,火线长。

卫星遥感提供了全球尺度气候变化和土地管理作用下火动态变化的证据。1998 至 2015 年间全球火燃烧面积减少了约 25%,减少最多的区域分布在非洲和南美洲的稀树草原、亚洲半干旱的草地,这些区域主要是由于人类土地管理导致景观破碎化,降低了燃料的连通性。西澳大利亚沙漠区、地中海的半干旱草地和灌丛,气候变暖相关的干旱限制了燃料的累积,致使火干扰减少<sup>[17]</sup>。热带地区火干扰表现出较强的年际变异,主要受厄尔尼诺与南方涛动(ENSO)的影响。

近年来,全球极端火事件持续增加,如 2017 年哥伦比亚大火、2018 年加州大火、2019 年西伯利亚大火和亚马逊大火、2019/2020 年澳大利亚南部大火等。考虑到未来全球变暖、大气水汽压亏缺持续加剧,高温、强风、干旱等极端气候事件增多,极端大火将变得更加频繁<sup>[24-25]</sup>。联合国环境规划署(UNEP)发布的最新报告《像野火一样蔓延:极端火灾与日俱增的威胁》指出:2030 年全球范围内极端火灾的数量将增加 14%,到 2050 年底将增加 30%,截至本世纪末将增加 50%<sup>[26]</sup>。极端大火对生态系统具有较大破坏性,且对人体健康、生命安全和经济财富形成严重威胁。因此,迫切需要加深对极端大火行为的了解,包括其发生机制、社会生态影响和风险评估,呼吁发展适应性森林管理模式来降低大火风险。

## 2 火发生的驱动机制

一般地,火的发生要满足 4 个条件:一是燃料负荷;二是燃料可燃性;三是天气状况,通常用火危险性系数,主要受温度、风速的影响;四是着火源,即自然闪电或者人为点燃。气候变化和人类活动共同决定着火干扰的分布格局、频率和强度<sup>[27-29]</sup>。气候系统不仅直接影响火发生的天气条件,而且间接影响火发生所需要的燃料物质<sup>[3,15,30-31]</sup>。闪电是北方森林火的主导因素,能够解释火年际变异的 55%<sup>[32]</sup>。ENSO 通过影响气候和植被的年际变异,进而影响着热带火的动态演化。相对于拉尼娜时期,厄尔尼诺时期火干扰发生的频率更高<sup>[18,33]</sup>。

气候的季节性也是影响火干扰的关键因素,考虑降水和温度的季节性能够提高全球火干扰的预测能力<sup>[34-36]</sup>。降水和降水季节性很大程度上决定了火干扰发生的时间和强度,并且降水季节性对火的影响程度要远大于年均降水量<sup>[34-35]</sup>。需要注意的是,降水对火的影响具有时空异质性<sup>[18,37]</sup>。旱季降水降低了燃料的可燃性,抑制火的发生;湿季降水增加了燃料负荷,促进火的发生。不同区域火发生的限制因素不同,降水对火的影响机制不同:相对湿润的区域,降水增加使得雨季延长、燃料可燃性降低,抑制火发生;而相对干旱的区域,降水增加能够促进燃料累积,有助于火发生。

除了自然过程,人类活动也塑造着火。人类活动对火的影响取决于人口密度、社会经济发展、景观破碎化程度等<sup>[17-18,38-40]</sup>。一方面人类通过增加着火源促进火发生,如用火来清理土地、焚烧农作物、管理自然资源

等。另一方面通过道路建设、农田开垦等降低可燃物的连通性来减少火发生。此外,人类通过火管理,如计划火烧(prescribed/controlled fire)来减少燃料累积,降低不可控的火风险<sup>[41]</sup>。总体而言,人类活动对火干扰的影响以抑制作用为主:农田扩张和农业集约化是 21 世纪以来全球火燃烧面积减少的主要驱动力,特别是在非洲北部<sup>[17-18]</sup>。

由于气候-植被-火之间相互作用和反馈机制的复杂性,加之人类对火的管理(图 1),厘清各要素对火干扰的影响仍存在很大的挑战。有学者基于火-气候模型,结合土地覆盖和人口数据,揭示了过去一千年全球火干扰驱动机制的演变,结果表明前工业时代,全球火干扰主要受降水驱动;工业革命时期,以人为驱动为主;21 世纪,全球火干扰转向以温度驱动为主<sup>[16]</sup>。尽管未来气候变暖将创造一个前所未有的火易发环境,但是人类对火的管理可能会使火和气候之间的关系发生解耦。例如,最近研究表明 1998—2015 年间全球范围内火燃烧面积减少了约 1/4,其中农田扩张和农业集约化是火干扰减少的主要驱动力<sup>[17]</sup>。



图 1 变化环境下气候-植被-火相互作用及反馈关系

Fig.1 Interactions and feedback of climate-vegetation-fire in a changing environment

### 3 火干扰的生态效应

火是陆地生态系统重要的生态过程,调节着生态系统的结构和功能,也影响着区域和全球气候系统。近年来,火的生态效应及其火对气候的反馈机制受到广泛关注<sup>[7,42-44]</sup>。火干扰直接影响着生态系统的组成:相较草本植被,火更能抑制木本植被的生长。相关研究表明:火燃烧面积减少的区域和木本入侵的区域大体一致<sup>[45]</sup>。此外,一些植物物种进化出了专门抵抗火干扰和从火干扰中恢复的策略,它们的生活史与特定的火干扰体系有关,例如火烧能够刺激开花和种子的释放<sup>[46]</sup>。这意味着火干扰体系的变化、火的引入或者去除都会引起生态系统群落组成的变化。因此,火干扰对于生物多样性和生境的维持非常重要<sup>[4]</sup>。

火干扰对气候的影响主要体现在两方面:一是通过生物质燃烧释放的大量温室气体(如二氧化碳、甲烷、气溶胶等)来影响大气组成和空气质量,这些统称为生物地球化学效应;二是通过改变地表物理特征(如反照率、蒸腾、粗糙度等)来影响陆地-大气间的物质、能量和水分交换,这些统称为生物物理效应<sup>[7,42-44]</sup>。火对陆地植被碳循环的影响是评价火生态效应的一个重要方面<sup>[47-48]</sup>。全球每年火烧直接向大气释放 2—3Pg

( $1\text{Pg} = 10^{15}\text{g}$ )的碳,这些直接的碳释放可通过火烧后冠层和土壤呼吸的变化以及植被生产力的增加而得到部分补偿<sup>[49-50]</sup>。此外,火释放的一些空气污染物也影响着陆地生态系统生产力,如臭氧通过影响气孔抑制植被生产力,气溶胶颗粒通过增强散射辐射促进植被生产力<sup>[51]</sup>。总体上,火降低了陆地生态系统碳汇能力,但降低的幅度存在不确定性。

全球尺度上,火烧引起地表温度的变化具有明显的纬度特征:高纬度地区,林火使得夏季增温,冬季制冷,全年具有增温效应;低纬度地区,林火主要是增温效应。火干扰对地表温度的反馈与火烧后植被演替有关,主要受地表反照率和蒸腾相互作用的影响<sup>[9]</sup>。火干扰对降水的影响机制更为复杂,目前仍缺少大尺度的观测证据。一方面,火烧后释放的感热可能会增加气团的不稳定,产生对流雨。另一方面,火烧后土壤水持续减少、蒸发减少,可能会形成一个更干的大气边界层抑制降水<sup>[52]</sup>。此外,旱季后期火释放的气溶胶可能会抑制雨季的降雨,但气溶胶的生命周期和影响范围不确定<sup>[43,53]</sup>。火烧后地表反照率发生变化,进而通过影响地表吸收的太阳辐射来影响降水<sup>[54-55]</sup>。一般地,火烧后,由于烧焦物的沉积,短期地表反照率降低;随后降雨和风消除了烧焦物,地表裸露使得反照率增加。但是火烧后地表反照率由减少到增加转折的时间不确定<sup>[8]</sup>,因此,火干扰对降水的影响存在时空异质性,不确定性更大。

#### 4 未来火动态及不确定性

由于气候-植被-火之间相互作用和反馈机制的复杂性以及人类活动对火的管理,未来火动态预测仍存在很大不确定性。一方面, $\text{CO}_2$ 施肥作用可能增加碳同化,提高植物的水分利用效率,改变生态系统的草本平衡,树木和灌丛入侵草地,影响燃料的累积。另一方面,气候变化引起的干旱可能抵消 $\text{CO}_2$ 施肥作用,增加燃料的可燃性。此外,全球变暖使得大气水汽压亏缺和潜在蒸散发增加,地表物质含水量降低,燃料可燃性增加<sup>[56]</sup>;温度升高使得大气运动更加活跃,大风发生的几率可能随之升高;同时,气温升高也会产生更多的闪电,使得受着火源限制的区域火干扰增加<sup>[57]</sup>。总之,随着未来气候变化,全球大部分地区火季节变得越来越长、极端火天气增加、极端大火发生的风险增加,特别是地中海、北方森林和亚马逊地区<sup>[24,58-60]</sup>。然而,在干旱半干旱区域,火主要受到燃料负荷的限制,未来气候变化相关的干旱限制燃料的累积,火可能会减少。

尽管未来气候变化将创造一个火干扰易发环境,然而简单的依据气候变化来推断火动态具有很大的挑战性。随着社会经济的发展和人口的增长,生态系统的开发强度加大,人为火源在增加;同时道路建设、农田开垦等土地管理活动降低了景观的连通性,抑制火的发生和传播。人类也通过计划火烧、绿色防火工程等加强对火风险的管理。未来气候和土地利用驱动下,地球系统过程模型预测全球火将增加,但是存在很大的不确定性。不确定性主要源于动态的反馈,即气候-火之间的关系是动态变化的,然而相关模型并没有考虑。其次,模型主要基于未来经济发展情景以及人口密度、农田面积、火源以及燃料可燃性之间的数量关系,很难表示真实的人类活动。此外,模型缺乏考虑人类活动对火的抑制作用,特别是在人为扑救火、土地管理集约化和道路建设导致地表破碎化和可燃物连通性下降等方面。

#### 5 火适应性管理

火是人类文明的起源,认识和掌握火表示着人类智慧的启迪。远古时代,人们在火光中得到光明,在寒冷中取得温暖,利用火抵御野兽侵袭、用火加热食物。狩猎者用火来管理自然资源,将食草动物吸引来烧死。工业化前农民进一步用火来清理土地,焚烧农作物残骸,即所谓的“烧荒农业”。当代人主要通过计划燃烧、土地清理等来抑制火源、减少易燃物、改造景观和生态。尽管如此,传统多强调火有害的一面及其破坏力,而较少展示火有利的一面以及在生态中的作用。火循环维持着生态平衡,从火适应的景观中排除火不可能也不可取。

自20世纪80年代中期以来,美国、加拿大、澳大利亚等国家已从防火阶段进入火管理阶段,在管理与技术等方面取得了新的进展。以火防火是保护、照料土地的重要方式。火管理最常见的就是计划火烧,即有计

划的消除易燃物,来降低大火爆发的可能,通常是在旱季早期集中燃烧(相比旱季晚期火烧强度更低)。实施前综合考虑可燃物周围的气候、地形等因素,考虑火烧后生态系统的恢复力,使火烧强度尽量控制在刚好能烧掉多余积累的易燃物,减少对当地生态系统的破坏<sup>[41,61-62]</sup>。然而,计划火烧也可能引起烟雾空气污染、影响人体健康。此外,人们也通过种植带状防火树木,创造“绿色防火带”进行生物防火,即充分利用某些植物的抗燃烧性,形成林火阻隔网络,对森林实行分区控制,防止火蔓延,以最大限度地降低林火损失<sup>[63]</sup>。

适应性火管理强调的不是防火或者灭火,而是适应火。通过科学管理燃料来减少极端大火发生的风险及其对社会经济系统的负面影响,同时也能够保护生物多样性、减少温室气体排放、维持生态系统服务。一些土著居民和可燃性景观共存了数千年,因此可以借鉴他们关于火干扰体系的知识,如“文化性放火”<sup>[64]</sup>。此外,森林砍伐容易引发极端大火,加速土壤中碳的排放,因此必须通过政策、经济刺激和教育来减少森林砍伐,重视森林的保护和火灾的防护。未来火适应性管理需要增加跨学科研究,充分了解人类世变化环境下火干扰体系是如何演化的,以及人类如何来适应。

## 6 结论

火长期、广泛地作用于陆地表面大多数生态系统,重塑生态系统的群落组成和结构,同时也影响着区域和全球气候系统。近年来,世界多个国家极端大火频发,火干扰、气候变化和人类活动之间的相互作用受到空前关注。变化环境下火干扰研究进展主要体现在火干扰的时空格局、驱动机制和生态效应等方面。总结起来,自 20 世纪 90 年代以来,火监测和风险评估技术已经进入高分辨率和大时代,观测内容由过去侧重火烧面积单一因素转向火干扰体系多重指标,精细刻画火干扰的行为特征和演化轨迹。气候变化和人类活动共同决定着火的分布、格局和演化动态。气候不仅直接决定着火发生的天气条件,也通过调节燃料负荷和燃料可燃性间接影响火。此外,气候的季节性也是影响火干扰的重要因素,考虑气候季节性能大大提高火的预测能力。人类活动一方面通过增加着火源来增加火发生的频率,另一方面通过农业实践和生态系统管理来控制可燃物质的积累,降低燃料的连通性,抑制火的发生和传播。火干扰对于生物多样性和生境的维持非常重要。此外,火干扰通过生物地球化学(生物质燃烧释放的温室气体和固体颗粒物)和生物地球物理(地表状况和陆-气相互作用)过程影响着气候系统。全球变暖背景下,干旱、高温、闪电和强风等极端气候事件频发,火季节持续时间更长,极端大火发生的风险增加。因此,未来亟需考虑火的适应性管理,减少火的生态环境和社会经济损失。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] Bowman D M J S, Balch J K, Artaxo P, Bond W J, Carlson J M, Cochrane M A, D'antonio C M, Defries R S, Doyle J C, Harrison S P, Johnston F H, Keeley J E, Krawchuk M A, Kull C A, Marston J B, Moritz M A, Prentice I C, Roos C I, Scott A C, Swetnam T W, Van Der Werf G R, Pyne S J. Fire in the Earth System. *Science*, 2009, 324(5926): 481-484.
- [ 2 ] Archibald S, Lehmann C E R, Belcher C M, Bond W J, Bradstock R A, Daniou A L, Dexter K G, Forrester E J, Greve M, He T, Higgins S I, Hoffmann W A, Lamont B B, Mcglinn D J, Moncrieff G R, Osborne C P, Pausas J G, Price O, Ripley B S, Rogers B M, Schwilk D W, Simon M F, Turetsky M R, Van Der Werf G R, Zanne A E. Biological and geophysical feedbacks with fire in the Earth system. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(3): 033003.
- [ 3 ] Kahi M N, Hanan N P. Fire in sub-Saharan Africa: The fuel, cure and connectivity hypothesis. *Global Ecology and Biogeography*, 2018, 27(8): 946-957.
- [ 4 ] Kelly L T, Giljohann K M, Duane A, Aquilué N, Archibald S, Battlori E, Bennett A F, Buckland S T, Canelles Q, Clarke M F, Fortin M J, Hermoso V, Herrando S, Keane R E, Lake F K, McCarthy M A, Morún-Ordóñez A, Parr C L, Pausas J G, Penman T D, Regos A, Rumpff L, Santos J L, Smith A L, Syphard A D, Tingley M W, Brotons L. Fire and biodiversity in the anthropocene. *Science*, 2020, 370(6519): eabb0355.
- [ 5 ] Feng X, Merow C, Liu Z H, Park D S, Roehrdanz P R, Maitner B, Newman E A, Boyle B L, Lien A, Burger J R, Pires M M, Brando P M, Bush M B, McMichael C N H, Neves D M, Nikolopoulos E I, Saleska S R, Hannah L, Breshears D D, Evans T P, Soto J R, Ernst K C, Enquist B J. How deregulation, drought and increasing fire impact Amazonian biodiversity. *Nature*, 2021, 597(7877): 516-521.
- [ 6 ] 陈利顶, 傅伯杰. 干扰的类型、特征及其生态学意义. *生态学报*, 2000, 20(4): 581-586.
- [ 7 ] Saha M V, Scanlon T M, D'Odorico P. Suppression of rainfall by fires in African drylands. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(16):

8527-8533.

- [ 8 ] Saha M V, D'Odorico P, Scanlon T M. Albedo changes after fire as an explanation of fire-induced rainfall suppression. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(8): 3916-3923.
- [ 9 ] Liu Z H, Ballantyne A P, Cooper L A. Biophysical feedback of global forest fires on surface temperature. *Nature Communications*, 2019, 10: 214.
- [ 10 ] van der Werf G R, Randerson J T, Giglio L, van Leeuwen T T, Chen Y, Rogers B M, Mu M Q, van Marle M J E, Morton D C, Collatz G J, Yokelson R J, Kasibhatla P S. Global fire emissions estimates during 1997-2016. *Earth System Science Data*, 2017, 9(2): 697-720.
- [ 11 ] Murphy B P, Bowman D M J S. What controls the distribution of tropical forest and savanna? *Ecology Letters*, 2012, 15(7): 748-758.
- [ 12 ] Randerson J T, Chen Y, van der Werf G R, Rogers B M, Morton D C. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117(G4): 1-23.
- [ 13 ] Scholes R J, Archer S R. Tree-grass interactions in savannas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1997, 28: 517-544.
- [ 14 ] 岳超, 罗彩访, 舒立福, 沈泽昊. 全球变化背景下野火研究进展. *生态学报*, 2020, 40(2): 385-401.
- [ 15 ] Jolly W M, Cochrane M A, Freeborn P H, Holden Z A, Brown T J, Williamson G J, Bowman D M J S. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 2015, 6: 7537.
- [ 16 ] Pechony O, Shindell D T. Driving forces of global wildfires over the past millennium and the forthcoming century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(45): 19167-19170.
- [ 17 ] Andela N, Morton D C, Giglio L, Chen Y, van der Werf G R, Kasibhatla P S, DeFries R S, Collatz G J, Hantson S, Kloster S, Bachelet D, Forrest M, Lasslop G, Li F, Manganon S, Melton J R, Yue C, Randerson J T. A human-driven decline in global burned area. *Science*, 2017, 356(6345): 1356-1362.
- [ 18 ] Andela N, van der Werf G R. Recent trends in African fires driven by cropland expansion and El Niño to La Niña transition. *Nature Climate Change*, 2014, 4(9): 791-795.
- [ 19 ] 韩丽, 戴必辉, 王秋华, 陈爱梅, 韩毓. 基于文献计量分析的林火遥感研究现状及发展趋势. *林业调查规划*, 2020, 45(1): 60-66.
- [ 20 ] Giglio L, Randerson J T, van der Werf G R. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118(1): 317-328.
- [ 21 ] Giglio L, Schroeder W, Justice C O. The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 178: 31-41.
- [ 22 ] Andela N, Morton D C, Giglio L, Paugam R, Chen Y, Hantson S, van der Werf G R, Randerson J T. The Global Fire Atlas of individual fire size, duration, speed and direction. *Earth System Science Data*, 2019, 11(2): 529-552.
- [ 23 ] Artés T, Oom D, de Rigo D, Durrant T H, Maianti P, Libertù G, San-Miguel-Ayanz J. A global wildfire dataset for the analysis of fire regimes and fire behaviour. *Scientific Data*, 2019, 6: 296.
- [ 24 ] Wang X L, Thompson D K, Marshall G A, Tymstra C, Carr R, Flannigan M D. Increasing frequency of extreme fire weather in Canada with climate change. *Climatic Change*, 2015, 130(4): 573-586.
- [ 25 ] Fairman T A, Nitschke C R, Bennett L T. Too much, too soon A review of the effects of increasing wildfire frequency on tree mortality and regeneration in temperate eucalypt forests. *International Journal of Wildland Fire*, 2015, 25(8): 831-848.
- [ 26 ] Sullivan A, Baker E, Kurvits T. Spreading Like Wildfire: The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires, 2022.
- [ 27 ] Kelley D I, Bistinas I, Whitley R, Burton C, Marthews T R, Dong N. How contemporary bioclimatic and human controls change global fire regimes. *Nature Climate Change*, 2019, 9(9): 690-696.
- [ 28 ] Zhuang Y Z, Fu R, Santer B D, Dickinson R E, Hall A. Quantifying contributions of natural variability and anthropogenic forcings on increased fire weather risk over the western United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(45): e2111875118.
- [ 29 ] Hantson S, Pueyo S, Chuvieco E. Global fire size distribution is driven by human impact and climate. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(1): 77-86.
- [ 30 ] 苏佳佳, 刘志华, 焦珂伟, 于跃, 李凯莉, 吕秋爽, 房磊, 王文娟. 气候变化对中国林火干扰空间格局的影响. *生态学杂志*, 2021, 40(12): 3810-3821.
- [ 31 ] Walker X J, Rogers B M, Veraverbeke S, Johnstone J F, Baltzer J L, Barrett K, Bourgeau-Chavez L, Day N J, de Groot W J, Dieleman C M, Goetz S, Hoy E, Jenkins L K, Kane E S, Parisien M A, Potter S, Schuur E A G, Turetsky M, Whitman E, Mack M C. Fuel availability not fire weather controls boreal wildfire severity and carbon emissions. *Nature Climate Change*, 2020, 10(12): 1130-1136.
- [ 32 ] Veraverbeke S, Rogers B M, Goulden M L, Jandt R R, Miller C E, Wiggins E B, Randerson J T. Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests. *Nature Climate Change*, 2017, 7(7): 529-534.
- [ 33 ] Chen Y, Morton D C, Andela N, van der Werf G R, Giglio L, Randerson J T. A pan-tropical cascade of fire driven by El Niño/Southern Oscillation. *Nature Climate Change*, 2017, 7(12): 906-911.
- [ 34 ] Saha M V, Scanlon T M, D'Odorico P. Climate seasonality as an essential predictor of global fire activity. *Global Ecology and Biogeography*, 2019, 28(2): 198-210.
- [ 35 ] Yu Y, Mao J F, Thornton P E, Notaro M, Wullschlegel S D, Shi X Y, Hoffman F M, Wang Y P. Quantifying the drivers and predictability of seasonal changes in African fire. *Nature Communications*, 2020, 11: 2893.

- [36] Turco M, Jerez S, Doblaz-Reyes F J, AghaKouchak A, Llasat M C, Provenzale A. Skilful forecasting of global fire activity using seasonal climate predictions. *Nature Communications*, 2018, 9: 2718.
- [37] Wei F L, Wang S, Fu B J, Brandt M, Pan N Q, Wang C, Fensholt R. Nonlinear dynamics of fires in Africa over recent decades controlled by precipitation. *Global Change Biology*, 2020, 26(8): 4495-4505.
- [38] Archibald S, Roy D P, van WILGEN B W, Scholes R J. What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa. *Global Change Biology*, 2009, 15(3): 613-630.
- [39] Bistinas I, Harrison S P, Prentice I C, Pereira J M C. Causal relationships versus emergent patterns in the global controls of fire frequency. *Biogeosciences*, 2014, 11(18): 5087-5101.
- [40] Chuvieco E, Justice C. Relations between human factors and global fire activity. *Advances in Earth Observation of Global Change*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010: 187-199.
- [41] Miller R K, Field C B, Mach K J. Barriers and enablers for prescribed burns for wildfire management in California. *Nature Sustainability*, 2020, 3(2): 101-109.
- [42] Hallema D W, Sun G, Caldwell P V, Norman S P, Cohen E C, Liu Y Q, Bladon K D, McNulty S G. Burned forests impact water supplies. *Nature Communications*, 2018, 9: 1307.
- [43] Rosenfeld D, Lohmann U, Raga G B, O'Dowd C D, Kulmala M, Fuzzi S, Reissell A, Andreae M O. Flood or drought: how do aerosols affect precipitation? *Science*, 2008, 321(5894): 1309-1313.
- [44] Saha M V, D'Odorico P, Scanlon T M. Kalahari wildfires drive continental post-fire brightening in sub-Saharan Africa. *Remote Sensing*, 2019, 11(9): 1090.
- [45] Venter Z S, Cramer M D, Hawkins H J. Drivers of woody plant encroachment over Africa. *Nature communications*, 2018, 9(1): 1-7.
- [46] Miller R G, Tangney R, Enright N J, Fontaine J B, Merritt D J, Ooi M K J, Ruthrof K X, Miller B P. Mechanisms of fire seasonality effects on plant populations. *Trends in Ecology & Evolution*, 2019, 34(12): 1104-1117.
- [47] 胡海清, 魏书精, 孙龙, 王明玉. 气候变化、火干扰与生态系统碳循环. *干旱区地理*, 2013, 36(1): 57-75.
- [48] 吕爱锋, 田汉勤. 气候变化、火干扰与生态系统生产力. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 242-251.
- [49] 胡海清, 罗碧珍, 罗斯生, 魏书精, 王振师, 李小川, 刘菲. 林火干扰对森林生态系统碳库的影响研究进展. *林业科学*, 2020, 56(4): 160-169.
- [50] 孙龙, 孙奥博, 胡同欣. 火干扰对森林生态系统土壤呼吸组分的影响研究进展. *生态学报*, 2021, 41(17): 7073-7083.
- [51] Yue X, Unger N. Fire air pollution reduces global terrestrial productivity. *Nature Communications*, 2018, 9: 5413.
- [52] Guillod B P, Orłowsky B, Miralles D G, Teuling A J, Seneviratne S I. Reconciling spatial and temporal soil moisture effects on afternoon rainfall. *Nature Communications*, 2015, 6: 6443.
- [53] Tosca M, Diner D, Garay M, Kalashnikova O. Human-caused fires limit convection in tropical Africa: first temporal observations and attribution. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42: 6492-6501.
- [54] Dintwe K, Okin G S, Xue Y K. Fire-induced albedo change and surface radiative forcing in sub-Saharan Africa savanna ecosystems; implications for the energy balance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, 122(12): 6186-6201.
- [55] Veraverbeke S, Verstraeten W W, Lhermitte S, Van De Kerchove R, Goossens R. Assessment of post-fire changes in land surface temperature and surface albedo, and their relation with fire - burn severity using multitemporal MODIS imagery. *International Journal of Wildland Fire*, 2012, 21(3): 243.
- [56] Sedano F, Randerson J T. Multi-scale influence of vapor pressure deficit on fire ignition and spread in boreal forest ecosystems. *Biogeosciences*, 2014, 11(14): 3739-3755.
- [57] Romps D M, Seeley J T, Vollaro D, Molinari J. Climate change. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science*, 2014, 346(6211): 851-854.
- [58] Ferreira L N, Vega-Oliveros D A, Zhao L, Cardoso M F, Macau E E N. Global fire season severity analysis and forecasting. *Computers & Geosciences*, 2020, 134: 104339.
- [59] Jain P, Wang X L, Flannigan M D. Trend analysis of fire season length and extreme fire weather in North America between 1979 and 2015. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, 26(12): 1009.
- [60] Riley K L, Loehman R A. Mid-21st-century climate changes increase predicted fire occurrence and fire season length, Northern Rocky Mountains, United States. *Ecosphere*, 2016, 7(11): n/a.
- [61] Francos M, Úbeda X. Prescribed fire management. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2021, 21: 100250.
- [62] Hunter M E, Robles M D. Tamm review: the effects of prescribed fire on wildfire regimes and impacts: a framework for comparison. *Forest Ecology and Management*, 2020, 475: 118435.
- [63] Cui X L, Alam M A, Perry G L, Paterson A M, Wyse S V, Curran T J. Green firebreaks as a management tool for wildfires: lessons from China. *Journal of Environmental Management*, 2019, 233: 329-336.
- [64] 张文文, 闫想想, 王秋华, 龙腾腾, 魏建珩, 高仲亮. 澳大利亚草地火研究进展. *世界林业研究*, 2021, 34(1): 113-118.