

林火制度及其构建基础研究



张凯旋^{1,2}, 王海晖^{1,*}, 吴超鹏¹, 秦振海¹, 吴泽鹏³

¹ 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027

² 安徽农业大学林学与园林学院, 安徽合肥 230036

³ 广东省林业科学研究院, 广东广州 510520

摘要: 对未来森林火灾概率和火灾的严重程度进行预测, 可以为制定全球生态防火和环境保护政策提供依据。本文着力探讨火制度及其构建基础, 以促进对火制度参数和生态系统作用机制的预测性理解。通过呈现遥感技术和火灾模型等在火制度研究和预测中的应用, 展示火制度参数研究进展和成果, 特别关注气候变化下植被特征对火制度的影响。研究表明, 火制度从区域到全球范围具有明显的时空特征, 火制度、植被和气候之间的联系紧密, 未来火制度可能受气候变化主导。基于此, 未来火制度研究需要更进一步跨时空研究火灾过程, 在量化火制度参数的同时, 不断探索气候变化导致火制度变化的机制和控制措施。火制度研究作为一种林火管理基础将得以持续发展。

关键词: 火制度; 研究参数; 构建基础; 林火生态; 植被可燃性; 火灾模型

DOI: [10.57237/j.jaf.2023.01.003](https://doi.org/10.57237/j.jaf.2023.01.003)

An Overview of Forest Fire Regimes and Their Constitution Basis

Kaixuan Zhang^{1,2}, Haihui Wang^{1,*}, Chaopeng Wu¹, Zhenhai Qin¹, Zepeng Wu³

¹ State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

² School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

³ Guangdong Academy of Forestry Sciences, Guangzhou 510520, China

Abstract: Prediction of future fire probability and severity lays the foundation for formulating ecological fire prevention and global environmental protection policies. The present work focuses on overview of the fire regimes and their constitution basis to promote the understanding on the fire regime parameters and the related mechanism operated in the ecosystem. Through the application of remote sensing technology and fire models in fire regime research and predictions, research progress and achievements were made in systematically quantifying the fire characteristic parameters, with the emphasis on the influence of forest stand characteristics on fire regimes under climate change. It has been well understood that the fire regimes have obvious spatiotemporal characteristics from regional to global scale, and the fire regimes are closely related to forest stands and climate. The future fire regimes are likely to be dominated by climate changes. For this reason, the future research on fire regimes needs to further study the spatiotemporal fire process and quantify the parameters of fire regimes through constantly exploring the mechanism of the fire regimes driven by climate changes and the control measures; meanwhile, the research on fire regimes will continue to serve as a basis for forest fire management.

基金项目: “十四五”重点研发计划“重大自然灾害防控与公共安全”重点专项子课题 (编号: 2022YFC3003005);
广东省林业科技创新重点项目 (编号: 2020KJCX003).

*通信作者: 王海晖, hhwang4@ustc.edu.cn

收稿日期: 2023-01-15; 接受日期: 2023-02-28; 在线出版日期: 2023-03-02

<http://www.agrforestry.com>

Keywords: Fire Regime; Evaluation Parameter; Constitution Basis; Forest Fire Ecology; Vegetation Flammability; Fire Model

1 引言

火灾一直是生态系统演变的重要塑造因素和推动力量,火灾与植被、环境和人类社会之间关系密切。特别是工业化以来,全球火灾频发,全球年均火灾面积高达 3.8×10^8 ha, 约占地表总面积 3% [1]。火灾排放的污染物严重影响了气候环境稳定性,气候条件的恶化又进一步导致了全球火灾的加剧。人类在生态环境方面正面临前所未有的挑战。自上个世纪五十年代,生态学家开始将研究焦点转向林火生态,并作为生态学的分支开展了大量研究,试图理解火灾在特定气候和植被条件下的发生机制和生态后果 [2]。了解历史火灾典型特征和火生态学可以为评估现在与历史长期火灾模式之间的偏差提供参考,为管理者、决策者和政策制定者提供信息 [3]。缘于此,火制度的概念在现代林火生态学和火灾管理中普遍使用。

“火制度”一词最初是在美国国家公园一份管理报告中提出的,为一些火灾可测量参数划出范畴,包括火灾范围、频率和季节性等,由此总结一个地区火灾发生的历史模式 [4]。随着时间的推移,生态学家和管理人员开始考虑火灾作为生态因子所起的生态和经济作用,火制度包含的参数逐步拓展 [5]。目前,火制度的概念已经扩展到对火灾及其在生态系统中的作用描述,据此协调火灾与生态环境之间的关系 [6]。通过在特定时空下火灾发生和特征展开量化计算,火制度进一步将火灾的多样性及其生态影响划分出一套完整的类别,相应构成林火生态学的基础。

现代遥感技术和模型计算的迅猛发展,使得跨时空和大尺度条件下的火制度研究成为现实。许多学者针对火制度及其构建参数开展量化了分析,充分展示了遥感数据与生态建模的有机结合与应用前景。越来越多的研究表明,以火灾频率、严重程度、范围及主导模式为核心的火制度地图集对于制定火灾缓解战略、自然资源管理和风险评估意义重大 [7]。源于深度介入干扰机制随时间的变化,覆盖了植被与土地利用和气候条件调节火制度的发展方向,相应推动气候、地形和林分动态等空间过程影响火制度的直观理解 [8]。

跟踪森林生态系统与火制度的时间和频率一致性,

确认特定气候条件下火灾发生的季节性、频率和严重程度,可以进一步揭示火灾与生态系统的适应过程 [9]。本文在大量文献调研的基础上,系统呈现遥感数据运用和火灾建模等研究方法在火制度参数量化以及火制度预测中的广泛应用,对火制度及其构建基础从区域到全球范围的作用机制进行分析,进一步了解火制度在长期历史中的作用机制。通过梳理气候变化下林分结构对火制度的影响,促进对火制度效应和生态系统作用机制的预测性理解,为全球环境保护、土地管理和生态防火政策的制定提供依据。

2 火制度基本构架和内容

2.1 构成要素和研究方法

林火的发生具有突发性和随机性,但特定地区的火灾发生又具有一定的规律性,将火灾在特定地区的发生模式定义为火制度,作为一个广泛的火灾特征集合描述火灾面积、严重程度、蔓延速率、频率和季节性等 [10] (表 1)。火灾范围指火灾波及的面积大小。火灾范围与生态系统长期发展过程经历的平均火灾规模有关。通常采用火灾对地域和景观生态系统的杀伤力来描述火灾烈度,即火灾或燃料消耗造成的植物死亡率 [11]。火灾损害烈度实际表征生态系统自身耐火性和抗火性。火灾季节性指的是一年中火灾最常见的时间。因为火灾发生的季节不同,同等强度的火灾对生态系统的影响也存在很大差异 [12]。发生在植被休眠或衰老期的火灾对生态系统的影响,要远远小于发生在种子期的火灾。通常用特定区域火灾发生的间隔,即平均火灾返回间隔来定义火灾频率 [13]。在不同地区、不同气候背景下,同种植被类型的森林生态系统的火灾频率大相径庭。火制度影响着群落的组成、结构和更新周期,对生态系统的稳定性有很大的影响 [14]。

传统火灾面积和火灾频率等数据主要通过野外实地勘测与机载监测提取 (表 1)。已有不少学者利用火灾历史记录和机载监测数据分析不同植被类型间火制

度的显著差异[15-21]。根据火灾历史资料，从火灾频率、区域分布、季节变化等方面研究特定植物类型的火灾发生规律，特别是火灾面积和火灾频率[21]。张文文等对计划烧除林下可燃物采样，通过实验室模拟燃烧试验，探究计划烧除林分下可燃物种类、载量、含

水率等参数对火场温度、火焰高度、火线强度等潜在火行为的影响[22]。研究表明，由于所涉地表可燃物载量在 1 kg/m² 以下，火焰高度在 0.5~1.5 m 内，火强度不超过 750 kW/m，属低强度地表火范畴[22]。

表 1 火制度评估参数和研究方法

评估参数	研究角度	研究区域	典型研究方法	核心认识和成果
火灾范围	气候；温度和降水	安哥拉等 12 个非洲国家；1400 个木本植物种类，含 117 科 562 属	模型模拟：GAMs 与未来气候数据预测 21 世纪火灾潜在分布	全球火灾分布由于温度和降水的作用可能会抵消；气候对野火的影响较大[15]。
	人为干扰情况	阿拉斯加东南部和中部汤加斯国家森林和丘加奇国家森林	数据分析：森林火灾数据评估火灾分布和面积随时间的变化	由人为引起的点火概率和范围的增加可能持续到未来[16]。
火灾季节性	火灾天气	1978 年至 2013 年间全球火灾数据	数据分析：由气候数据及火灾危险指数推导火灾天气季节长度	全球平均火灾天气季节增加了 18.7%，全球火灾的频率增加了 53.4%[17]。
	土地利用与气候变化	以全球为视角观察到火灾频率和严重程度	模型模拟：气候模型评估火灾天气指数和人为气候变化	人为火灾天气变化继续影响火灾活动[18]。
蔓延速率	燃料类型	葡萄牙：蓝桉（ <i>Eucalyptus globulus Labill</i> ）和白松（ <i>Pinus armandii</i> ）与灌木林形成的森林	模型模拟：用最小旅行时间算法模拟火灾扩散	区域内火灾的可能性、蔓延速率、强度存在显著差异[19]。
	火灾历史燃料管理	白俄罗斯放射生态保护和乌克兰切尔诺贝利禁区；桦树（ <i>Betula</i> ）、樟子松（ <i>Pinus sylvestris L. var. mongolica Litvin.</i> ）和栎木（ <i>Quercus spp.</i> ）生长区	量化分析：基于最小旅行时间算法（MTT），推导可能火灾路径	区域潜在野火间存在相互依赖关系，防火带规划对缓解火灾蔓延有显著意义[7]。
火灾烈度	土壤特征	新泽西州松树（ <i>Pinus</i> ）生长地；白松（ <i>Pinus armandii.</i> ）、白栎（ <i>Quercus fabri Hance.</i> ）和白橡树（ <i>Quercus palustris Münchh.</i> ）等生长地	实验分析：火灾后测定野火对土壤性质和微生物群落	野火导致有机土壤微生物群落和养分巨大变化，最大变化发生在灾后第一年[20]。
	火灾历史和间隔	美国北落基山脉生态区：冷杉（ <i>Abies fabri (Mast.) Craib</i> ）、云杉（ <i>Picea asperata Mast</i> ）、黑松（ <i>Pinus thunbergii Parl.</i> ）和白皮松（ <i>Pinus bungeana Zucc.</i> ）生长地	模型模拟：以火灾严重程度地图集评估连续野火间的相互作用	第二次火灾的严重程度降低 5-13%；火灾间的负交互作用在低海拔森林最为明显[9]。

Power 等对过去和现在的火灾活动的全球数据分析表明，特定区域气候下的火灾频率和火灾面积受植被类型影响[23]。Keeley 等基于多光谱数据，通过提取火灾前后植被反射率变化以获取过火面积和火灾烈度[10]。由于火灾过后全球植被监测指数（GEMI）显著下降，通过植被反射率变化，可以降低气溶胶、烟雾污染以及图像中土壤因素的干扰，大大提高数据精度[23]。遥感技术逐渐成为火制度研究的重要手段，这得益于卫星遥感图像的时空分辨率的进步，提供了全球范围内更精准的火灾活动数据（表 1）。运用野外调查采样与实验室测定法建立火灾模型，以模拟不同燃料特征下的火灾烈度和蔓延速率[24]。

将遥感数据与历史火灾记录关联起来，可以更好地了解火制度是如何随时间和地点变化的。Jolly 等利用火灾天气指数（FWI）描述火灾季节长度的变化 [17]，FWI 对影响火发生的各个气象要素进行有机结合，是表征火灾发生危险程度的量化指标。根据卫星气象数据计算全球火灾危险指数，用来描述火灾天气季节长度，由此跟踪全球火灾所呈现的增加模式和趋势。

围绕火制度的构建，从最初的回归模型逐渐发展成为以空间分析为手段的多因素综合模型。将遥感数据与生态历史记录关联起来，可以更好地了解火制度如何随时间和地点变化[15]。现有的火制度模型集成了气候、植被和地形等生态因子，对火灾概率和火灾的严重程度

进行预测。通过将全球火灾模式与生态系统多样性联系起来，利用火灾发生时和火灾前后的卫星遥感数据，校验不同模型预测结果的准确性，从而推动了全球尺度上火制度的研究[25]。

2.2 建立起来的典型认识与成就

火制度在时间上具有波动性、季节性和周期性等特点[26]。建立起来的认识表明，野火在温暖或干燥的季节更为普遍，此时燃料湿度和天气条件最有利于点火和火灾蔓延。一年中火灾最常见的时间定义为火灾季节。据统计 2011–2018 年，整个地中海森林地区都发生过火灾，平均每年有近 3 万起森林火灾，烧毁近 350 kha 土地[27–28]。2012 年至 2022 年间全球火制度的主要变化特征为：火灾频率大，严重程度加重；单次火灾烈度大、过火面积大；世界森林火灾分布不均匀，受地理位置和气候影响不一，往往森林资源越丰富地域，森林火灾越严重[21]。

不少学者利用火灾历史记录和模型模拟分析不同植被类型间火制度的显著差异，典型认识在表 2 中做了罗列和对比。森林火灾主要发生在春季，3 月份火灾频率最高。春秋两季降雨少，森林湿度较小，风力大，火灾发生概率更高。森林火灾面积大，且森林火灾的扑救难度大，蔓延很快，火灾会不断地蔓延甚至出现新的火场[35]。森林火灾强度大于灌木和草地。火灾烈

度与海拔成正相关，与坡向呈负相关。海拔 1417–1715 m 范围内多发生高烈度火灾[28]。草原火灾集中在降水较少、风速大的春、秋两季。由于草本层干燥，密集连续，地表火发展因而极为迅速[29]。火灾强度表现为草甸草原>典型草原>荒漠草原。灌木丛林中草本层发生燃烧时，火墙较窄，宽度通常 5–8 m。由草本和下层灌木共同燃烧时火势猛烈，火线宽度在 15 m 以上，尤其是采伐迹地，火势更强。主要受山谷风和坡度所控制[30]。整个北半球火行为特征也呈现相同的分布规律[34]。鉴于不同植被类型的可燃性差异，可以作为一项生态防火工程建设思路，为构建火灾弹性景观提供系统的手段和工具。

与 30 年前相比，全球气候变化导致年度火灾天气增加，同时造成全球许多地区火灾季节起始时间更早、持续时间更长[35]。FWI 作为表征火灾发生危险程度指标，可以用于有效评估各个气象要素对火灾发展趋势产生的影响。基于此，Jolly 等利用卫星气象数据计算全球火灾危险指数及其动态变化，结果反映出全球火灾天气季节长度呈明显增加模式：1979–2013 年间全球平均火灾天气季节长度增加了 18.7%，火灾季节在长期天气影响下增加了 108.1%，全球火灾频率增加了 53.4%[17]。这其中部分可以归结到森林火灾产生的气溶胶抑制了雨云的形成，加剧了局部干旱现象，相应将火灾季节延长了 15–30 天。

表 2 不同植被类型基本火制度对比

	草原火灾（草本植物群落）	灌木丛林火灾（灌木、草本为主）	森林火灾（乔灌草结合）
火灾面积	草原地势平坦，可燃物易燃，一旦发生火灾，在风力作用下，火灾迅猛扩展；过火面积呈现春秋两季较大，夏冬两季较小的季节性规律[29]；	草本层燃烧火头纵深较窄，宽度通常 5–8 m；由草本和下层灌木共同燃烧猛烈，火墙宽度在 15 m 以上，扑救困难，大范围的过火面积[30]；	通常森林火灾面积大，较难发现；火灾会不断地蔓延甚至出现新的火场，森林火灾的扑救难度大[31]；
火灾烈度	草原枯落物着火点低，一旦发生火灾，蔓延速度快，火势猛；草原地区风向多变，人畜转移困难，极易造成伤亡[32]；	由于草本层干燥，密集连续，因而地表火发展极为迅速，尤其是采伐迹地，火势更强[30]；	林区地形较复杂，且森林火灾一般具有突发性；森林的火灾强度大于灌木和草地，针叶林的火灾强度大于阔叶林[31]；
蔓延速率	火蔓延速度快，风能补充燃烧所需氧气，形成对流，加大风热；在草原地形条件下，坡度越大，火向上燃烧的速度越快，通常可达 4 km/h 以上[33]；	主要受山谷风和坡度所控制，具有间歇性；缓坡和陡坡上的火蔓延快，山坳、小平地上的蔓延速度减缓[30]；	森林地表火的蔓延速度一般在 10 km/h，而树冠火则可达到 15 km/h；风速达到 4 m/s，蔓延速度大致呈线性增加[34]；
火灾季节	集中在降水少、风速大的春秋两季（内蒙古草原）[29]。	多发生在春夏；一天中衰期在早上 4 时–10 时；盛期在午后 15–17 时和晚上 20–22 时（华北平原）[30]。	大部分地域主要发生在春季，全球 3 月份的火灾频率最高[31]。

火灾范围大小和火灾烈度与生态系统长期发展过程中的火灾历史有关，这说明了扰动相互作用的复杂性。一般用火灾对地域和景观生态系统的杀伤力来描

述火灾烈度，即火灾造成的植物死亡率[36]。Parks 在美国西部 125 个保护区组成的四个研究区域内进行了调查，运用约 1972–1984 年间火灾严重程度监测趋势

(MTBS) 识别和绘制火灾活动分布状况, 发现在极端天气条件下, 野火自身调节火制度的能力显著降低, 野外火灾不再能限制灾后 6–18 年的火灾蔓延状况, 同时观察到未来几十年火灾季节将不断增加[37]。

借助于先进的决策支持模型, Ager 等对美国西部森林恢复计划中野火场景进行预测。预测结果表明: 如果不允许野火发生, 未来发生严重火灾的可能性达到 57%; 在野火过后相当长一段时间内, 地表火的概率仅为 30%, 而由地表火转变的树冠火概率仅为 13%,

并且火线强度显著降低[38]。通过进一步的火灾模拟计算, Ager 等探讨了乌克兰地区受切尔诺贝利灾难污染后出现野火的危险性。模拟结果确定出潜在火灾可能性最大的地域, 为受历史火灾干扰之外的区域(图 1A)。其中, 研究区西南部分火焰长度值高(图 1B)并且燃烧概率(图 1C)相对较高; 潜在火灾规模在研究区域内同样呈现增大的趋势(图 1D) [7]。林火管理者应逐渐接受野火作为一种火灾管理手段而存在, 承认火灾在燃料管理和火灾防控过程中发挥的作用。

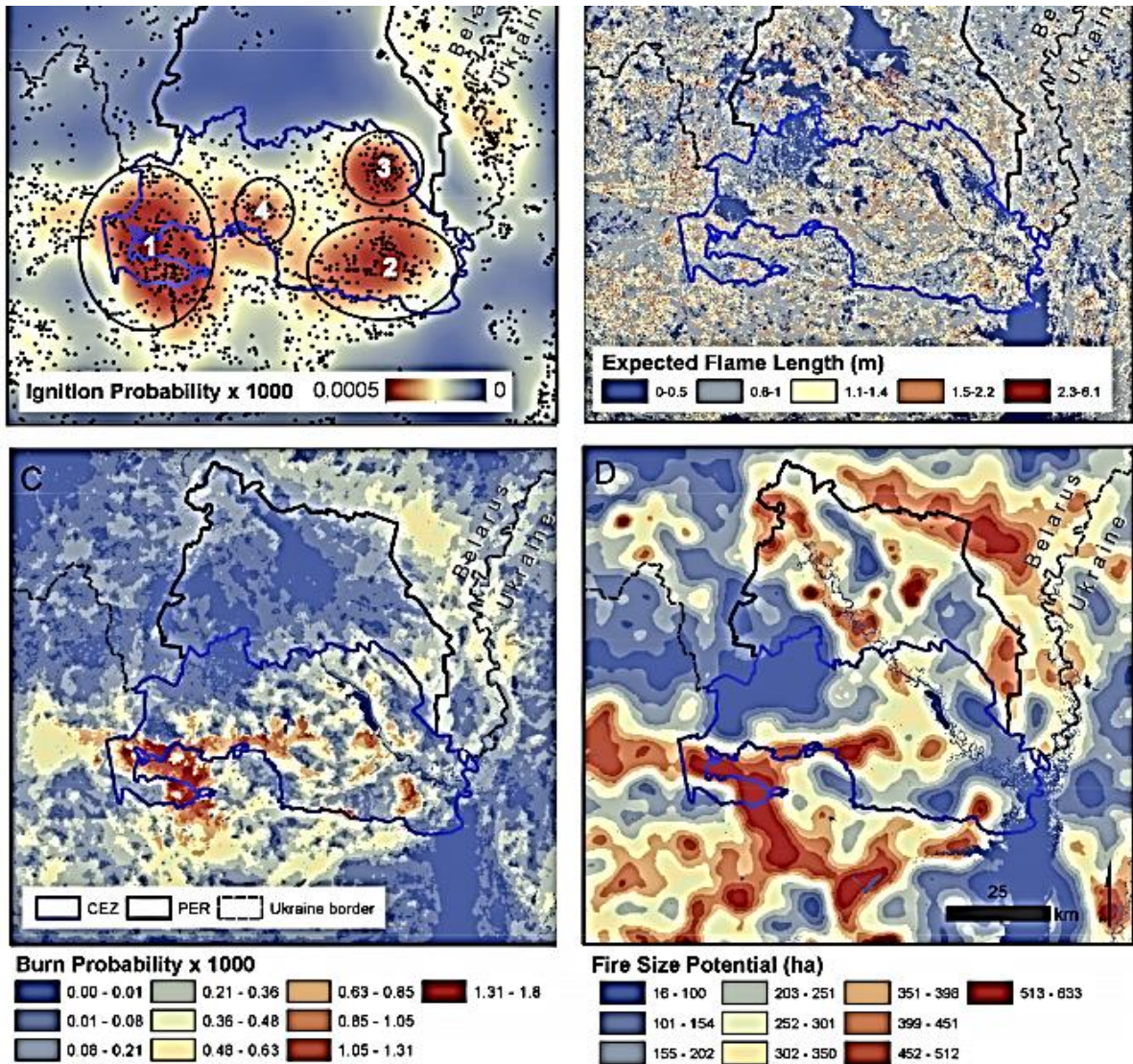


图 1 模拟观测污染地区的火制度变化结果。其中, A 为着火概率, B 是预期火焰长度, C 为燃烧扩展概率分布, D 则为火灾范围[7]

结合随机火灾历史数据和未来气候变化数据, Krawchuk 等运用两组平行统计模型分别预测 21 世纪不同时间段火灾危险性分布的变化[15]。预测结果以色块标出, 红色表示火灾发生概率增加区域, 黄色代表

基本没有变化, 而绿色则意味着出现下降(图 2)。结果显示出火灾在 2010–2039 年、2040–2069 年和 2070–2099 年间都表现出越来越高的可变性: 在 2010–2039 年时间段内火灾概率相对呈现较剧烈的变化(图

2A&D)，反映在短期内火灾活动的变化可能比许多陆地物种的更快；在 2040-2069 年时间段（图 2B&E）和 2070-2099 年时间段（图 2C&F），全球火灾概率的区域差异性会有所增加。对于大部分陆地面积来说，特别是北美和欧亚大陆，火灾概率将会发生相对较大的变化。在陆地生物圈中，有 21%被列为当前火灾发生

低概率区，38%则被列为易发生火灾的高概率区域，剩余部分较为正常[15]。由于温度和降水的相互作用，区域火灾概率的增加可能会被其他地点的减少所抵消。全球变暖将进一步改变火制度，并大大增加高烈度火灾的可能性，相应对火灾管理、生态系统的保护以及整个景观中林分结构产生重大影响。

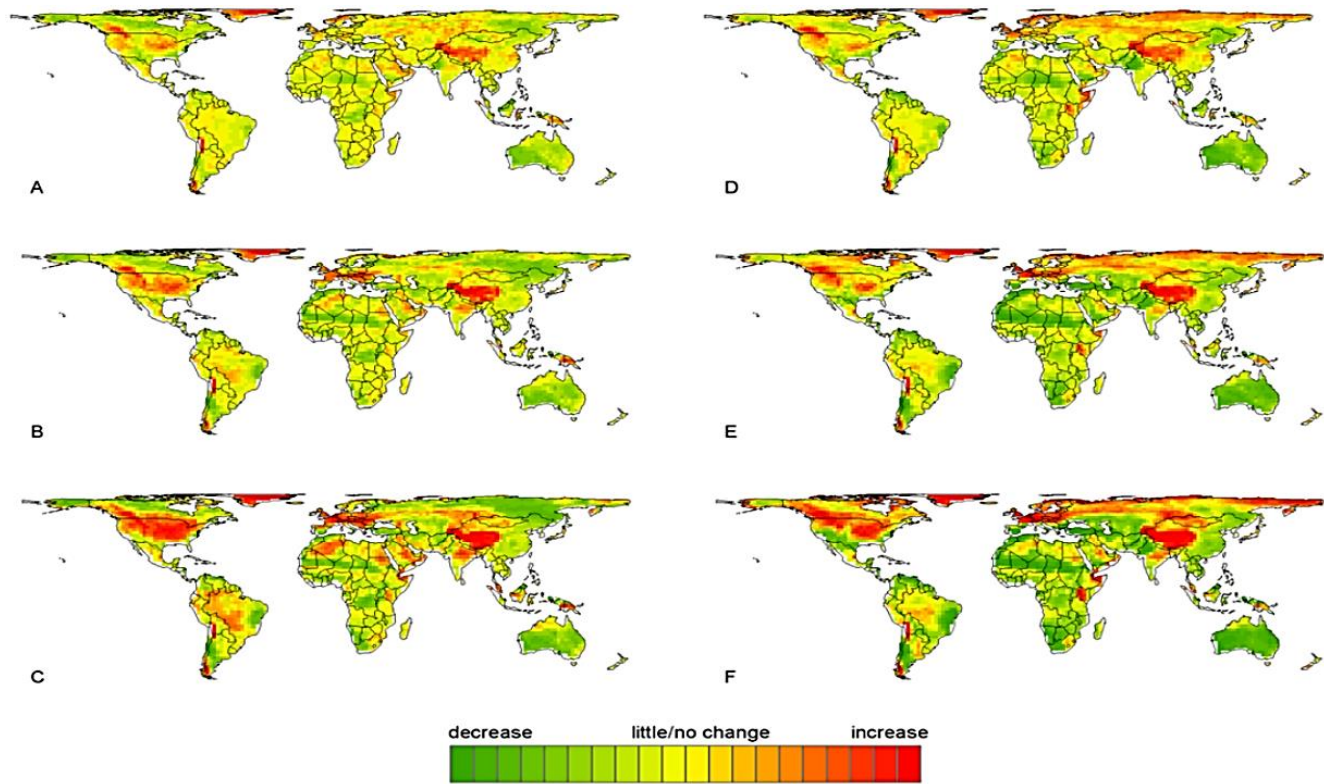


图 2 基于植被净初级生产力和单一气象参数的分组模型分别预测全球不同时间段火灾易发地区分布变化情况对比。其中，A&D 对应 2010–2039 年，B&E 对应 2040–2069 年，而 C&F 则对应 2070–2099 年间[15]

3 火制度构成的物理基础

3.1 典型火制度与植被内在联系

天然生长植被是森林可燃物的主要来源，而植被条件直接影响森林可燃物属性、荷载和分布等，决定着燃烧是否可以发生以及如何扩展。燃料的含水量（FMC）是许多火灾预测模型及风险指数计算使用的主要参数[35]，在气候变暖背景下，温度升高会增加植物的蒸腾作用，减少燃料的含水量，延长火灾发生时域和季节。燃料荷载决定了能量的大小，根据燃料荷载建立火行为量化指标和模型，可以预测潜在火行为。由此计算出的火蔓延燃料载量临界值可以作为评

定生态系统稳定性的重要依据。以澳大利亚的森林环境和林地凋落物的可燃性为线索，Varner 等系统阐述了树木凋落物易燃性的构成要件，提出松属植物（*Pinus Linn.*）和栎属植物（*Quercus L.*）作为最易燃的入侵物种之一，可以通过特定的分布方式和形态以及与环境互交，抑制当地火灾的发生和蔓延[39]。为管理和保护受火灾干扰的生态系统和减轻火灾的负面影响，不仅需要量化火制度的影响，也需要识别林分类型导致火制度变化的机制。

森林作为一个开放性的生态系统，森林形成的独特林分结构在林火的发生与蔓延中起着决定性作用。Blackhall 等人收集了 2001 年火灾后亚高山森林和高大灌木丛中长期牲畜圈地的数据，分析评估了以下变量：总细小燃料、死亡/总细小燃料百分比、总细小燃料的垂

直分布、凋落物连续性以及细小燃料连续性。结果表明,食草动物可以通过降低林分易燃性、总细小燃料和凋落物深度、破坏林分的连续性来产生抗火作用,从而降低火灾传播的可能性[40]。林分类型、气候变化和人类活动的相互作用会改变火灾的发生模式,极大地影响特定地区的火制度发展动向。生物质燃料超负荷积累会使得森林生态系统对气候变化的敏感性增加,林分特征和火制度动向是林火生态管理策略变化的重要驱动因子。

3.2 气候变化与火制度演化

前边提到过, 以往研究表明火灾发生具有明显的地域性和季节性, 火灾频繁发生在气温高、降水少的暖干时期[41]。这揭示了气候因素与火制度之间存在长期化和深度的相关性(图 3)。值得注意的是, 大量研究展示出环境温度是影响火灾发生的主导因素之一, 火灾频率随温度升高而增加; 降水量也是影响火灾发生的重要因素[42]。基于 2005–2019 年间云南省火点数据的逻辑回归模型计算, 日最小相对湿度的关键阈值为 $28.07\% \pm 11.85\%$, 日最高温度为 $21.23 \pm 11.15^{\circ}\text{C}$, 森林火灾发生的概率为 50% [43]。最低相对湿度和最高温度分别是影响森林火灾的两大因素; 例如, 造成地中海沿岸国家频繁发生森林火灾的主要原因是每年长达 5 个月(6–10 月间)的高温少雨, 使森林内凋落物的含水率维持在极低的水平, 在夏季大风和极端天气的影响下, 极易发生森林火灾[27]。

1485 个严重过火地域的树苗存活率和密度分布的现场观测数据。按物种记录了树苗密度、灾前估测的树木密度、与最近的活种子源树的距离、树木死亡率、烧伤严重程度、实地核查的树木死亡率以及所处坡度、海拔和经纬度[44]。与 1985–1999 年相比, 2000–2015 年间降水量显著降低, 火灾后森林生长条件日益变差, 幼苗密度显著降低, 气候导致的林分结构和范围的变化对现在和未来的火制度产生了重要影响[44]。

如图 3 所示, 在气候变化和人为干预的作用下, 森林的恢复力也会显著下降, 对林火的发生有着显著影响。区域干旱与温度的变化紧密耦合, 导致发生在其气候耐受性边缘的干燥森林更容易引发林火, 在过火后最容易转化为非森林。21 世纪持续变暖, 火灾天气指数持续增加, 突出了适应火灾扰动和危险变化的紧迫性。气候是影响生态系统稳定和火制度演化的重要因素, 火制度在时间上受到气候、火灾历史、林分特征和其他干扰的影响。这些因素中任何一个变化都将导致火制度改变, 因而说火制度本质上是动态的 [44-45]。景观尺度的火灾行为由当地天气条件决定, 这些研究增加了对空间反馈的自我调节景观的理解, 以及自上而下的控制, 如气候、火灾历史, 对这些反馈的影响。但是, 火制度对气候变化的响应模式的了解仍然有限, 仍需要开展大量研究来确认火制度的作用机制。研究结果将对生态防火工程建设和利用火灾管理野外燃料有重要帮助。

4 结论与前景展望

针对火制度的研究已形成完整认知体系。结果表明从区域到全球范围的火灾事件普遍具有明显的时空特征。火灾多发生在温暖或干燥的季节，火灾频率和火灾烈度在不同植被类型间表现为森林>灌木>草地。卫星遥感数据和模型构建提供了关于火灾事件的实时数据。卫星数据以更高的分辨率克服了污染的干扰，逐渐成为了全球火灾研究最常用的数据源，火制度模型的构建从最初的回归模型逐渐发展为以空间分析为手段的综合模型。火灾频率、严重程度、范围和模式的火制度地图集对于火灾战略缓解和自然资源管理、风险评估、说明干扰机制随时间的变化以及了解气候、植被和土地利用如何影响火灾机制具有实用价值。

火制度构建基础的研究集中于气候因子、植被因子和人为因素对火制度的影响。运用全球火灾活动模型对火灾活动进行分析确认,全球气温升高可能导致全球某

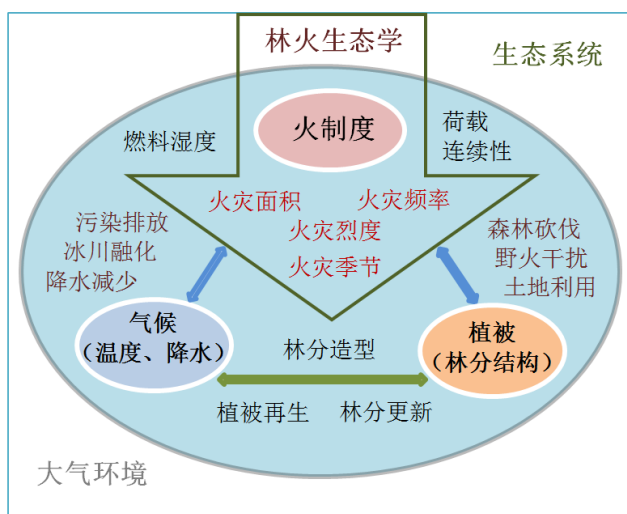


图3 气候、植被与火制度之间的相互作用机制

Stevens-Rumann 等分析了 1988 年至 2011 年间

些地区火灾发生率增加。研究结果证实了气候变化会影响景观尺度下植被的分布与组成, 森林作为开放的生态系统, 林火的发生对植物燃料特征和气候变化高度敏感, 气候变化和火灾之间的反馈作用会进一步改变火制度的气候驱动趋势。目前全球气候日益严峻, 气候条件的不断变化, 林火行为的预测更为复杂。在 21 世纪, 火灾活动极有可能会被环境温度提升所左右。

人们逐渐认识到火灾是一个重要的生态过程, 但火灾与气候和植被的相互作用机制才刚刚开始系统的探索。在全球气候模型中更好地认识火灾机制的多样性, 这对于理解火制度与气候、林分的作用机制, 确定火灾管理策略, 减少排放和增加碳储存至关重要。此外, 为了理解火灾过程, 广泛的时间尺度是必要的。目前, 大多数研究倾向于在单一的时间尺度上研究火灾过程, 科学技术的进步为了解火灾制度在几十年到百年乃至千年的时间尺度上的变化提供了机会。

森林防火是世界各国共同面临的课题与挑战。面对未来森林防火的严峻形势, 我国在森林防火行业将通过开展更多的国际交流与合作, 吸收并促进国际先进的科研成果问世, 提高林火管理水平和防控能力, 为有效维持生态环境和保护人类赖以生存的家园做出应有贡献。

参考文献

- [1] Forkel, M., Andela, N., Harrison, S., et al. Emergent relationships with respect to burned area in global satellite observations and fire-enabled vegetation models [J]. *Biogeosciences*, 2019, 16 (1): 57–76.
- [2] Cooper, C. F. Ecology of fire [J]. *Ecology*, 1959, 40 (1): 102–108.
- [3] Daubenmire, R. F., Ecology of Fire in Grassland [J]. *Advance in Ecological Research*, 1968: 209–266.
- [4] Raulin, V. Seasonal rainfall regimes in the United States [J]. *Monthly Weather Review*, 1904, 32 (10): 470–471.
- [5] Goldammer, J. G., Mutch, R. W., Pugliese P., et al. FRA 2000 - Global Forest Fire Assessment 1990–2000 [R]. Forestry Department, FAO, Roma, 2001.
- [6] Krebs, P., Pezzatti, G. B., Mazzoleni, S., et al. Fire regime: history and definition of a key concept in disturbance ecology [J]. *Theory in Biosciences*, 2010, 129 (1): 53–69.
- [7] Ager, A. A., Lasko, R., Myroniuk, V., et al. The wildfire problem in areas contaminated by the Chernobyl disaster [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 696, 133954.
- [8] Geary, W. L., Doherty, T. M., Nimmo, D. G., et al. Predator responses to fire: A global systematic review and meta-analysis [J]. *Journal of Animal Ecology*, 2019, 89 (4): 955–971.
- [9] Harvey, B. J., Donato, D. C., Monica, G., et al. Burn me twice, shame on who? Interactions between successive forest fires across a temperate mountain region [J]. *Ecology*, 2016, 97 (9): 2272–228.
- [10] Keeley, J. E. Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, 18 (1): 116–126.
- [11] Rothermel, R. C., and Deeming, J. E. Measuring and Interpreting fire behavior for correlation with fire effects [R]. General Technical Report TNT-93. USDA, 1980.
- [12] Page, S. E., Siegert, F., Rieley, J. O., et al. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997 [J]. *Nature*, 2002, 420 (6911): 61–65.
- [13] Van Wagner, C. E. Age-class distribution and the forest fire cycle [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1978, 8 (2): 220–227.
- [14] Reardon, J. R., Ryan, K. Factors affecting sustained smouldering in organic soils from pocasin and pond pine woodland wetlands [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, 16: 107–118.
- [15] Krawchuk, M. A., Moritz, M. A., Parisien, M. A., et al. Global Pyrogeography: the current and future distribution of wildfire [J]. *Environmental Science*, 2009, 4 (4), e5102.
- [16] Stephens, S. L. Forest fire causes and extent on United States Forest Service Lands [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2005, 14 (3): 213–222.
- [17] Jolly, W. M., Cochrane, M. A., Freeborn, P. H., et al. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013 [J]. *Nature Communications*, 2015, 6, 7537.
- [18] Abatzoglou, J. T. Williams, A. P. Barbero, R. Global emergence of anthropogenic climate change in fire weather indices [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46 (1): 326–336.
- [19] Oliveira, T. M., Barro, A. M. G., Ager, A. A., et al. Assessing the effect of a fuel break network to reduce burnt area and wildfire risk transmission [J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2016, 25 (6): 619–632.
- [20] Mikita-Barbato, R. A., Kelly, J. J., Tate III, R. L. Wildfire effects on the properties and microbial community structure of organic horizon soils in the New Jersey Pinelands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 86: 67–76.

- [21] 吴月圆, 舒立福, 王明玉, 等. 近年世界森林火灾综述 [J]. 温带林业研究, 2022: 1–7.
- [22] 张文文, 闫想想, 王秋华, 等. 计划烧除对云南松林地表可燃物火行为的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44 (5): 69–76.
- [23] Power, M. J., Marlon, J., Ortiz, N., et al. Changes in fire regimes since the Last Glacial Maximum: an assessment based on a global synthesis and analysis of charcoal data [J]. *Climate Dynamics*, 2008, 30: 887–907.
- [24] Carl, H. K. Ecological and sampling constraints on defining landscape fire severity [J]. *Fire Ecology*, 2006, 2 (2): 34–59.
- [25] Pausas, J. G., Ribeiro, E. Fire and plant diversity at the global scale [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26: 889–897.
- [26] Larjavara, M., Kuluvaime, N. T., Rit, A. H. Spatial distribution of lightning-ignited forest fires in Finland [J]. *Forest Ecology & Management*, 2005, 208 (1): 177–188.
- [27] Massada, A., Carmel, Y., Koniak, G., et al. The effects of disturbance based management on the dynamics of Mediterranean vegetation: A hierarchical and spatially explicit modeling approach [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220 (19): 2525–2535.
- [28] Jurvadius, M. Health and protection: forest fires (prediction, prevention, preparedness and suppression) [J]. *Encyclopedia of Forest Sciences*, 2004: 334–339.
- [29] 丽娜. 气候变化背景下内蒙古草原火灾风险动态评价与预估研究 [D]. 东北师范大学, 2021.
- [30] 王贺富. 山地森林火灾蔓延的特点及扑救方法 [J]. 河北林业, 2009, (6): 12–13.
- [31] Spessa, A., Harrison, S. P., Prentice, I. C., et al. Confronting a burning question: the role of fire on Earth [J]. *Eos Trans Am Geophys Union*, 2003, 84: 23–25.
- [32] Archibald, S. D. P., Vanwilgen, B. W., Scholes, R. J. What limits fire? An examination of drivers of burnt area in Southern Africa [J]. *Global Change Biology*, 2009, 15 (3): 613–630.
- [33] Johnston, L. M., Wang, X., Emi, S., et al. Wildland fire risk research in Canada [J]. *Environmental Reviews*, 2020, (7): 1–23.
- [34] Cesar, C., Alan, B., Philippe, C., et al. Spatial temporal correlation analyses of global burned surface time series from remote sensing data (1982-1999) [C]. *The 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Saint Petersburg, 2005, 25–28.
- [35] Westerling, A. L. Warming and earlier Spring increase Western U.S. forest wildfire activity [J]. *Science*, 2006, 313 (5789): 940–943.
- [36] Morgan, C., Losey, A., Trout, L. Late-Holocene paleoclimate and treeline fluctuation in Wyoming's Wind River Range, USA [J]. *Holocene*, 2014, 24 (2): 209–219.
- [37] Parks, S. A., Holsinger, L. M., Miller, C., et al. Wildland fire as a self-regulating mechanism: The role of previous burns and weather in limiting fire progression [J]. *Ecological Applications*, 2015, 25 (6): 1478–1492.
- [38] Ager, A. A., Vaillant, N. M., McMahan, A. Restoration of fire in managed forests: a model to prioritize landscapes and analyze tradeoffs [J]. *Ecosphere*, 2013, 4 (2), art 29.
- [39] Varner, J. M., Kane, J. M., Kreye, J. K., et al. The flammability of forest and woodland litter: A synthesis [J]. *Current Forestry Reports*, 2015, 1 (2): 91–99.
- [40] Blackhall, M., Raffaele, E., Paritsis, J., et al. Effects of biological legacies and herbivory on fuels and flammability traits: A long-term experimental study of alternative stable states [J]. *Journal of Ecology*, 2017, 105 (5): 1309–1322.
- [41] Carcaillet, C., Bergeron, Y., Richard, P. J. H. Change of fire frequency in the eastern Canadian boreal forests during the Holocene: does vegetation composition or climate trigger the fire regime? [J]. *Journal of Ecology*, 2001, 89 (6): 930–946.
- [42] Running, S. W. Climate change: is global warming causing more, larger wildfires? [J]. *Science*, 2006, 313 (5789): 927–928.
- [43] Zhu Zheng., Deng Xiaofan, Zhao Fan., et al. How environmental factors affect forest fire occurrence in Yunnan Forest Region [J]. *Forests*, 2022, 13 (9), 1392.
- [44] Stevens-Rumann, C. S., Kemp, K. B., Higuera, P. E., et al. Evidence for declining forest resilience to wildfires under climate change [J]. *Ecology Letters*, 2018, 21 (2): 243–252.
- [45] Abatzoglou, J. T., Williams, A. P. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113 (42): 11770–11775.