

# 不断变革中林火生态学外延与内涵



张凯旋<sup>1,2</sup>, 王海晖<sup>1,\*</sup>, 靳邦鑫<sup>1</sup>, 宋志龙<sup>1</sup>, Aktar Shamima<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027

<sup>2</sup>安徽农业大学林学与园林学院, 安徽合肥 230036

**摘要:** 林火生态学是研究森林火灾的生态后果及相互关系的学科。随着气候变化加剧和森林火灾形势恶化, 目前林火生态学已成为生态学非常活跃的分支。本文回顾林火生态学发展历史, 从火历史、火因子以及火制度对生态系统作用机制等方面阐述林火生态学的外延和内涵。许多生态学家针对林火对生态环境的影响以及生态系统对林火的适应性等进行大量研究, 林火生态学发展历程可分为三个时期: 研究初期认识到林火的破坏性, 焦点集中于林火控制; 拓展研究阶段着力于林火在火灾管理中的有效运用以及标志林火生态学分支体系确立的第三阶段。用先进技术手段和数学模拟, 林火生态学可以对火干扰后的森林群落进行长期的动态监测和评估。计划烧除已发展成林火管理的有效手段, 而生态防火则是未来林火管理的必由之路。

**关键词:** 林火生态学; 发展历史; 研究架构; 火制度; 生态防火; 森林生态管理

**DOI:** [10.57237/j.jaf.2022.01.002](https://doi.org/10.57237/j.jaf.2022.01.002)

## The Extension and Connotation of Forest Fire Ecology Under Constant Innovation

Kaixuan Zhang<sup>1,2</sup>, Haihui Wang<sup>1,\*</sup>, Bangxin Jin<sup>1</sup>, Zhilong Song<sup>1</sup>, Aktar Shamima<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

<sup>2</sup>School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

**Abstract:** Forest fire ecology is a discipline to study the ecological consequences of forest fires and the interrelationships among them. With the intensification of climate change and the deterioration of forest fire status, forest fire ecology has become a very active branch of ecology. In this paper we reviewed the development history of forest fire ecology and expounded the extension and connotation of forest fire ecology, fire factors and regimes as well as their interaction with the ecological systems. Previous ecologists have conducted a lot of research on the impact of forest fire on the ecological environment and the adaptability of ecosystems to forest fire. The development of forest fire ecology can be divided into three periods: in the initial period the destruction of forest fire was recognized with the study objective being focused on forest fire control; in the expansion period, efforts were made to the application of forest fire in the fire management and the third period was symbolized as the founding of the entire discipline. With the application of the advanced technology and mathematical models, forest fire ecology provides successful examples in carrying out long-term prediction on the forest community dynamics after fire intrusion. Planned burning have been developed as effective means of forest fire management, whereas ecological fire mitigation is considered as a new concept in forest fire management.

基金项目: 中国科学院“百人计划”择优支持专项资助 (编号: Z0050).

\*通信作者: 王海晖, [hhwang4@ustc.edu.cn](mailto:hhwang4@ustc.edu.cn)

收稿日期: 2022-09-28; 接受日期: 2022-10-27; 在线出版日期: 2022-12-15

<http://www.agrforestry.com>

**Keywords:** Forest Fire Ecology; Innovation History; Research Framework; Fire Regime; Ecological Fire Prevention; Forest Ecological Management

## 1 引言

火作为一个古老的周期性干扰因子,自陆生植物起源以来就一直存在[1]。毫无疑问,林火与植被、环境和人类社会之间关系密切,近些年若干震惊世界的森林大火更是推动人们增进对林火生态的研究。林火生态学的核心是探讨森林火灾的生态后果及相关问题、林火与森林生态系统、环境系统的关系及其相互作用和影响,其产出着力于森林火灾过后区域的生态系统中各个成分的恢复与重建决策过程[2]。

林火生态学经历漫长外延与发展的阶段。早先的研究忽略了林火与其他因子之间的关系,直到上个世纪九十年代前后,生态学家们才逐步建立一个支持火灾进化作用的理论体系,现代林火生态学则开始着眼于林火与植物、土壤和其他因子间的相互作用。林火生态的研究从全面的植被发展理论转移到以过程导向的生态模型的构建,确认特定时间段火制度与生态环境相互作用机制随时间的变化,力图理解植物在特定火行为条件下的适应过程以及群落和景观水平上的相互作用,为生态防火措施的制定奠定基础[3]。

由于大量学者的持续努力,针对林火生态因子驱动作用的研究已经取得较大进展,林火生态因子与火灾之间的作用机制也建立起较丰富的认识,但是关于生态系统多样性和稳定性以及火制度的动态特性对林火的响应模式的了解仍然有限。与此同时,林火生态因子在林火中的作用以及林火的生态后果和量化评估还没有一致的说法[4],生态系统对火灾的依赖性也一直存有争议。纵然如此,无论从哪个角度来说,研究林火生态的发展和作用机制,揭示植物的生态学特性和火因子的生态促进作用,对于维持生态系统的平衡、调节系统之间的关系,均有着重要意义[5]。本文在大量文献的基础上,通过描述林火生态学的发展历史,展示林火生态因子在长期火灾历史中的作用机制以及林火对生态建设的影响,为科学的林火管理和生态建设提供理论依据。

## 2 林火生态学发展历程

林火生态学主要针对过去某段时间的林火生态历史

开展研究,探索和考究林火行为的规律以及造成的生态后果,是构建火与生态建设性关系的重要途径。自上个世纪起,林火生态学的起源和发展经历漫长的过程。依据其不同阶段的认识特点和研究重点,研究历史基本可以划分为三个阶段,即发展初期、发展转折期和发展鼎盛期[6]。

1900-1960年为研究初期。1900年前后,林火研究开始有详细记载。一些生态学家认识到火灾的破坏性,如1871年发生在美国威斯康星州的两场火灾使2250人丧生,林火的预防与扑救成为林火管理的焦点。1947年Daubenmire系统论述了火因子的生态学地位,并把火因子列为七大环境因子之一,研究焦点随之开始逐渐改变,计划火烧被提倡[7]。1959年,Cooperl首次使用“火生态学”这一概念[8]。在火生态研究的初始阶段,相关研究少且内容分散。其中,计划烧除技术的诞生则有效促进了林火管理工作(表1)。

1960-1985年认识转折期。一系列重大火灾让生态学家意识到,一味地控制火灾会带来更大的灾难,从而开始重视火灾管理;如美国林业管理部门开始把燃料管理与土地利用政策综合考虑。在这个阶段,许多生态学家和林学家开始合作,探讨林火对植物、土壤和微生物群落的影响,研究林火与环境因子之间的交互作用,并于1974年将这些研究成果汇集成《Fire and Ecosystem》论文集,对林业和火灾管理起到了极大的推动作用[9]。一些国家开始广泛使用计划火烧作为林火管理措施,并取得了良好的效果[4]。1978年美国农业部出版《Fire Influence》系列丛书,论述了火与气候、土壤、植被和微生物之间的联系;1983年五位生态学家合著《Fire in Forestry》,揭示林火生态研究理论的应用价值,进一步确认将火烧作为火灾管理的重要手段[10]。这些著作标志着林火生态学已经萌发出生态学独立分支(表1)。

第三阶段以生态学分支学科的诞生为标志[6]。1985年以来林火生态学作为独立的分支开展系统的研究论述,并通过吸收其他学科的先进研究方法,极大地推动林火生态学的发展[11]。接下来的林火生态研究注重林火与其他因子之间的干扰作用,确定林火长期生态后果的动态量化指标,并据此将重点转移到优先处理事项的决策上来[12]。

表 1 林火生态学发展时期划分

发展阶段	基本特征	主要推动者	代表性贡献	学科发展的意义
发展初期 1900-1960 年	火灾会对生态系统和社会造成不可逆转的破坏	Daubenmire R. F. (1947)	论述火因子列为七大环境因子之一。	林火研究的焦点从完全的火灾控制开始转变为提倡计划火烧
		Cooperl C. F. (1952)	提出“火生态学”概念	正式确立火生态学相关的专门研究
		Carson R. L. (1962)	《Silent Spring》	作为生态学返老还童的起点，人类步入了新的生态学时期
发展转折期 1960-1985 年	认为火具有“好、坏”二重性，更好地理解火在自然环境中的作用规律	美国生态学家 (1974)	《Fire and Ecosystem》论文集	开始跟踪火对土壤、鸟类和温带森林生态系统的影响以及对火烧的有效运用
		美国农业部林业局专家 (1982)	《Fire Influence》系列丛书	精辟论述火的双重性，为计划火烧的应用提供理论依据
		Wright H. A. and Bailey A. W. (1982)	《Fire Ecology》	标志着火生态学正式形成
		国际生态学家 (1983)	合著《Fire in Forestry》	火生态作为林火管理的理论基础，用以指导森林防火和用火
发展鼎盛期 1985 年至今	林火生态学成为扰动生态学的一部分，获得系统论证	多国生态学家	对生态学分支做归纳和论述。	对火在生态系统对生物、人类和社会的影响进行深入研究，推动了火生态学理论的完善和研究方法的丰富。

### 3 林火生态学基本架构

经过一百多年的持续发展，林火生态学不断刷新其外延和内涵。现今的研究工作致力跟踪森林生态系统的火灾特征与行为以及时间和频率的一致性，以进一步理解火灾在生态系统结构和功能中的作用。形成的认识不但适用于长期战略性林火规划，也适合跟踪特定时间段内林火生态随时间的变化[13]。

#### 3.1 林火生态学研究内涵

作为林火生态学主体研究内容，林火制度呈现为生态系统经历火灾所具有一致性行为模式以及间隔周期。火制度主要用于表征火在生态系统结构及功能中的作用，了解特定生态系统在具体火制度下存活和更新发展的动向。火灾波及范围与生态系统长期发展过程经历的平均火灾规模有关，不同规模的火灾对生态系统的影响有很大的差异。受较大规模火灾侵袭的地区，种源和土壤受损严重，更新速率大大减缓，相对需要更长的时间完成恢复和重建过程[14]。即使同等强度的火灾，火灾发生的季节性差异对生态系统的影响不同：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在种子期发生的火灾[15]。

森林可燃物的类型、荷载分布等决定着火灾是否发生以及如何燃烧。森林中的生物质由木质材料构成。木质材料在衰变过程中，其木质素的比例会有所增加，

导致森林发生火灾风险也随之增加[16]。燃料湿度则是火灾行为的调节器，受燃料尺寸和外部环境条件影响较大。燃料荷载决定了能量的大小，根据燃料荷载建立其潜在火行为评估量化指标和计算模型，预测潜在火行为[17]。由此可以推算出火蔓延燃料载量临界值，可以作为维系生态系统稳定的重要依据。

利用植物的可燃性差异，通过运用营林措施和燃料管理措施，降低生态系统内的燃料荷载，提高森林的耐火性和抗火性，由此抑制火灾的发生和蔓延。其中最受欢迎的是西方国家广泛使用的遮荫型防火隔离带和中国林业部门开发的生物防火隔离带（图 1）[5]。作为两种典型的生态防火措施，它们的融合可以为不同植被分布场景的防火需求提供多种经济处理方法。作为一项生态防火工程建设思路，相应可以为构建火灾弹性景观提供系统的手段和工具[18]。

景观中植被的空间分布变化影响作为火灾燃料的连续性，从而影响火灾的发生与蔓延，导致火灾类型的改变，如由地表火向树冠火转变等。Ager 等在模拟受污染地区的野火蔓延风险时发现，防火隔离带网络可以降低火灾蔓延速率和燃烧可能性，在火灾发生频率高的地方尤其显著（图 2）。该评估方法有助于改进现有的防火隔离系统[19]。森林生态系统中的燃料管理是调控火生态因子的有效方式，可以改变特定林地潜在火制度和火行为，从而实现对林火的有效管控。

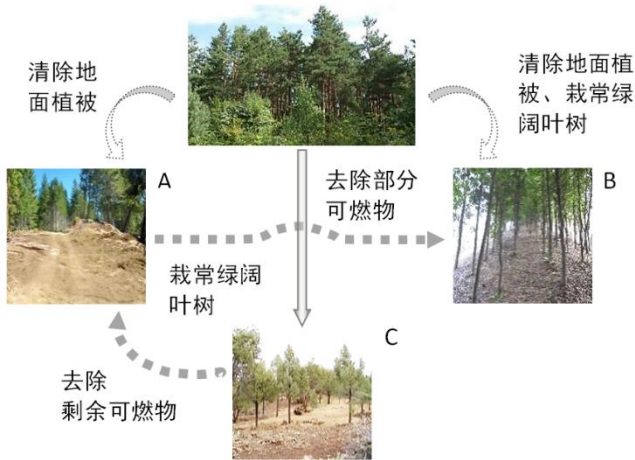


图 1 传统防火措施向生态防火工程的转变历程，其中 A 为全光式防火隔离带，B 为生物防火林带，C 为遮荫型防火隔离带[5]

火线强度标志着生物质在火灾中的消耗量，其通过对土壤、植物根系以及周围植物的热辐射以及对流换热作用，造成对生态系统的影响[20]。通常用火灾烈度和火灾造成的植物死亡率来表征火灾对地域和景观生态系统的杀伤力[21]。火灾间隔期即火灾发生的频率，可以衡量火灾在特定生态系统中的表现。特定区域的火灾发生频度会影响着该地区群落的组成、结构和更新周期，对生态系统的稳定性有很大的影响[22]。火灾制度在时间和空间上的异质性，对生态系统中群落的组成、结构和动态变化具有重要的塑造力。因此，火灾活动的多样性简约为火制度的呈现，据此构成火灾生态学的基础。

火与燃烧释放的能量和释放速率有关，直接影响生态系统的结构和功能稳定性[20]。燃烧释放的能量决定着生态系统对火灾的响应方式和生态后果[18]，主要火灾特征为火焰高度、火焰长度、火线强度、扩散速率、火焰厚度和停留时间等。火因子受火灾所处环境的变化而变化，燃料的分布、地形和气候条件对火因子的影响最显著，相应对其生态后果的影响也最显著。因此，需要充分认识到火因子的双重性。运用生态学原理和技术，可以最大限度地降低火因子的破坏性，发挥火因子在维持生态系统平衡方面的作用。

气候和地形因素主要影响燃料的含水量。环境温度和湿度对燃料的含水量有直接影响[23,24]。燃料含水量及坡位与海拔存在一定的梯度关系[25]。风速通过影响燃料表面水分的蒸发速率影响燃料的含水量，当火灾来临时会不断补充火区的氧含量，从而加速燃烧发展过程[26]。虽然林火受多种因素干扰，开展林火与环

境的关系研究依然可以为林火管理决策的制定提供理论基础。

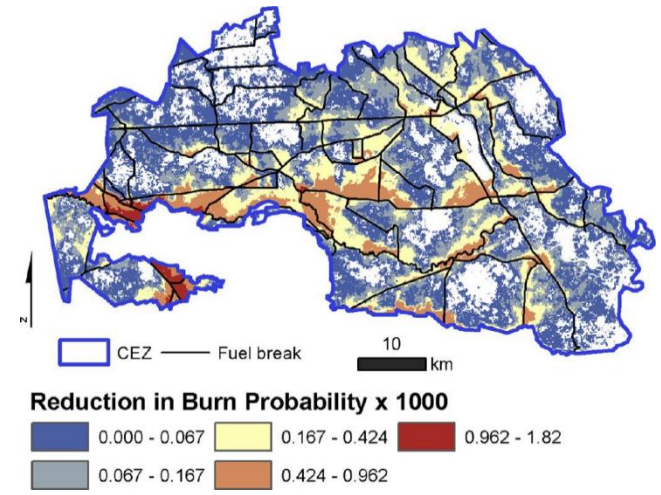


图 2 通过对切尔诺贝利核电站爆炸污染地区的野火风险建模和计算，获得防火隔离带在降低森林植被燃烧概率的量化评估结果[19]

### 3.2 林火生态学影响与外延

火灾对生态系统的影响，不仅在单个植物的水平上，而且包括群落和景观水平上的影响。此外，植被作为森林系统中的主要燃料，可以将火灾对植被的生态影响视为一种相互作用，而不仅仅是一种单向效应。植物的不同反应主要是由于火行为的不同以及植物作为个体生存的适应性。

通过建模，Ager 等对德舒特国家森林潜在火行为对过火后林分生长密度开展研究。模拟结果表明[27]，如果不进行燃料处理，发生火灾的可能性达到 57%；在开展燃料处理后，地表火发生的概率仅为 30%，而由地表火转变而为的树冠火的概率仅为 13%，并且火线强度显著降低（图 3）。未处理条件下火灾造成过火后林分密度显著降低；相比之下，经燃料处理过的林分密度在灾后没有减少，反映了林火管理对林分密度同样存在显著影响[27]。通过调控森林林分特征和可燃性差异控制林火规模，可以调节森林耐火性，降低火灾风险，同时还产生良好的生态效益[28]。

植物群落通常通过一个自我强化的循环机制，以特定的方式和物种在已有的火灾制度下生存下来[29]。现在林火的研究范围扩展至更广泛的地上生态系统，强调从单个植物个体的研究到整个生态环境的影响[30]。一个主要的挑战是将全球火灾适应特征数据库整合到全球火灾和植被模型中，由此预测未来的变化情

况。当今气候条件变化迅速，林火频率和烈度与日俱增，探索复杂火行为条件下土壤养分调控机制是当今林火生态学的研究热点。研究过火后土壤理化性质的变化、土壤—植物生长之间的耦合机制，对于深入了解全球气候变化下，生态系统之间的平衡规律以及林火管理有着重要意义。

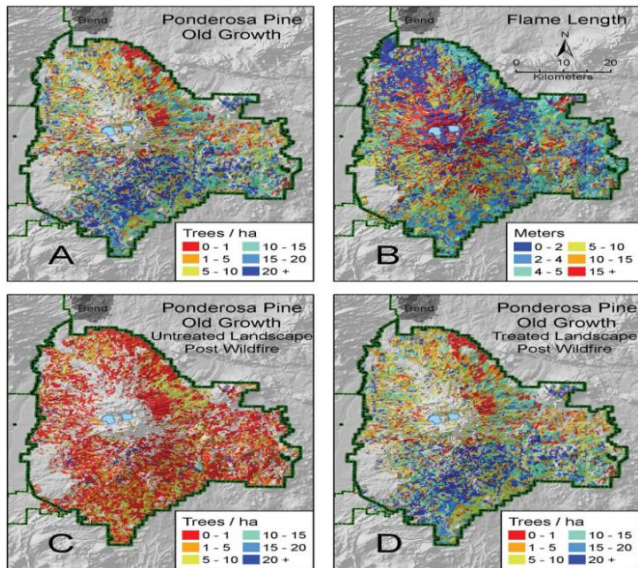


图3 针对德舒特国家森林东南部灾后森林恢复的量化恢复目标模型计算结果：A 预测的唐氏松老种的生长密度(PPOG)，B 针对未经处理林分模拟野火的潜在火焰长度，C 针对未经处理林分预测野火过后的PPOG，D 处理过林分野火后的PPOG预测结果[27]。

林火直接改变土壤理化性质与微生物量，促使生态系统养分再分配，影响养分在生态系统中的循环。林火过后，土壤有机质矿化、灰分沉积、pH增加以及氮和磷等养分含量增加，提高土壤养分的利用率，有利于植被生长。在植被恢复与重建过程中，外部环境的变化，如温度变化、风蚀、冲刷作用和淋溶作用等。这些因素共同调整土壤养分特征，从而影响植被的恢复，并对整个生态系统的平衡进行再调整[31]。

林火对生态系统的干扰作用与其他生态因子密不可分，综合讨论林火后生态系统各个成分间的作用机制和养分循环规律，可以为合理的生态恢复措施提供理论依据，有利于科学调控计划火烧的频率。因此，需要进一步研究林火后土壤的变化与植被的恢复与重建过程。目前已经有一些生态学家开始探讨林火过后生态系统中土壤—植被养分的耦合作用以及对环境的影响，形成的初步认识如图4所示。因为过火，地被物稀疏造成局部蒸腾作用减弱；与此同时，火烧迹地

上留有木炭、灰分等黑色物质，大量吸收太阳的长波辐射，使地表升温，土壤干燥程度加剧。这些因素都会促使林火发生的频度提升[30,31]。为管理和保护受火灾干扰的生态系统、减轻火灾负面影响，不仅需要量化火制度的影响，也需要识别植物丰度和植物群落组成导致火制度动态变化的机制。这些机制与气候、土地利用和植物物候学特征等密切相关，通过影响这些因素中的一个或多个来影响生态系统的生存和进化，进而对火制度产生影响。由于火行为的不确定性，林火后植物—凋落物—土壤的化学计量特征研究有待强化，以进一步夯实植物—凋落物—土壤对林火的响应机制。

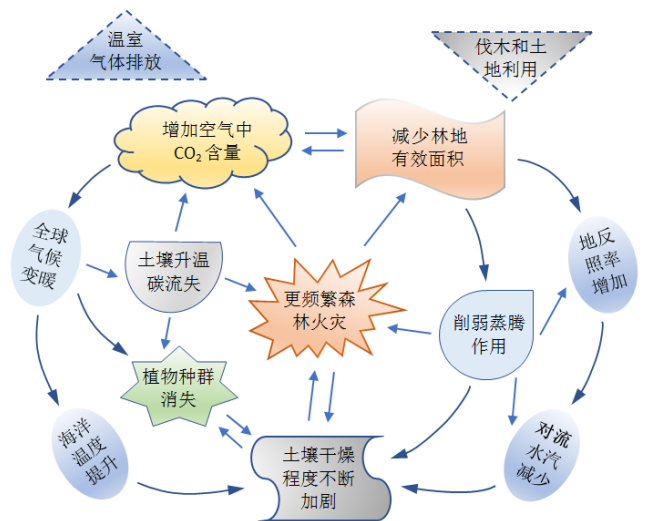


图4 全球气候变暖情形下林火与森林植被及土壤等因素的反馈作用机制和产生的影响

## 4 结论与前景展望

林火生态研究经历研究初期、拓展阶段和体系发展三个阶段。以火制度、火行为等为研究主体，林火生态学致力于探索林火的形成、过火范围、火灾烈度和扩散规律以及森林可燃物特征和林火生态管理内容。外延涵盖各种特殊火行为及其与生态系统的作用机制，燃料管理和生物防火理论等。技术研究中最突出的成果是计划火烧的理念及其应用。利用火灾的生态作用开展燃料管理，在一些国家得到了广泛应用并取得良好的效果。

遥感技术和计算机技术在林火预测预报中广泛应用，逐步建立起气象—林火模型—火灾控制技术为一体的森林防火体系。生态防火技术利用植物之间的可燃性差异，通过营林措施等，降低燃料荷载，同时提高耐火性，其

能够减少林火发生,控制林火蔓延。现有的防火林等生态工程,均在短期内就可以取得良好的效果。跨学科、跨领域的研究,对林火与其他生态因子的关系、林火与人类社会的关系都能得到更好的呈现。

尽管目前对于小型火灾的控制能力大大提高,但在大型林火面前人类依然处于被动状态。20世纪中期以来,许多林火生态学家认为燃料荷载量已经远远超过自然能承受的最高水平。与此同时,相关管理措施过分看重森林生态系统的资源特性,忽略了森林作为自然生态系统一部分的本质。这种认知偏离引发林火管理的极端性理念,造成燃料管理措施未能同步体现森林的生态价值。在这种情况下,生态学家提出了生态防火的必要性。生态防火在我国有着突出的火灾防控效果,只是这项技术目前在国际上还没有得到太多的关注。

以往林火生态研究集中在单一时间尺度上,缺乏对生态系统恢复长期过程的认知,仍需要进一步的研究来确立火烧迹地植被景观动态变化过程和相应的模型。火灾制度模型的建立,对于评估涉及火灾的各种生态反馈背后的机制,以及在一系列建模背景下改善火灾的表现意义重大。数字技术和大数据场景的发展促进了林火的生态后果研究,林火生态学的研究可望更加迅速、高效和便捷。

管理部门已经认识到火灾是一个重要的生态过程,在生态系统的恢复与重建过程中有着不可替代的作用。但是,林火生态因子与其他生态因子之间的相互作用关系仍不清楚,需要进一步研究生态系统之间的反馈机制,包括确定反馈的普适性,尤其是植物与火灾之间的正反馈和负反馈机制。这将会极大地促进我们对火生态的认识,同时更好地预测未来火灾模式。因此,开展林火生态的研究,对维持森林生态系统的长期平衡、改善森林生态系统的循环和发挥森林资源在中国特色社会主义建设中的作用有着特殊的意义。

## 参考文献

- [1] Glasspool I. J., Edwards D., Axe L. Charcoal in the Silurian as evidence for the earliest wildfire [J]. *Geology*, 2004: 32, 381–383.
- [2] He T., Lamont B. B., Downes K. S. Banksia born to burn [J]. *New Phytol*, 2011: 191, 184–196.
- [3] Stephens S. L., Ageep J. K., Ful ın Z., Northw P., Rommet H., Swetnamand W., Turner M. G. Managing forests and fire in changing climates [J]. *Science*, 2013: 342, 41–42.
- [4] Keeley J. E., Pausas J. G., Runde P. W., Bond W. J., Bradstock R. A. Fire as an evolutionary pressure shaping plant traits [J]. *Trends Plant Sci*. 2011: 16, 406–411.
- [5] 王海晖, 陶骏骏, 盛昌栋. 森林防火隔离带技术的变革与优势 [J]. *世界林业研究*, 2015: 28 (6): 46–52.
- [6] Agee J. K. Fire ecology of Pacific Northwest forests [J]. Washington, DC: Island Press, 1993.
- [7] Daubenmire R. F. Ecology of Fire in Grassland [J]. *Adv. Ecol. Res.* 1968:5: 209–266.
- [8] Cooper C. F. Ecology of fire [J]. *Ecol.* 1959:40(1):102–108.
- [9] Kozlowsky T. T., Ahlgren C. E. Fire and Ecosystem [J]. Academic Press, *Physiological Ecology*. 1974:1-5.
- [10] Chandler C., Cherrey P., Thomas P., Trabaud L., Williams D. Fire in Forestry [J]. Wiley & Sons. 1983: 171–258.
- [11] Pausas J. G., Keeley J. E., Schwilk D. W. Flammability as an ecological and evolutionary driver [J]. *Journal of Ecology*, 2017: 105, 289-297.
- [12] Archibald S., Lehmann C. E. R., Belcher C. M., Bond W. J., et al. Biological and geophysical feedbacks with fire in the Earth system [J]. *Environmental Research Letters*, 2018: 13.
- [13] Reinhardt E. D., Keane R. E., Brown J. K. Modeling fire effects [J]. *International Journal of Wildland Fires*, 2001:10, 373–380.
- [14] 王海晖, Aktar S., 盛昌栋, 等. 国际林火发展动向和全球化应急管理对策 [J]. *森林防火*, 2020: (1): 1–8.
- [15] Siegert F., Ruecker G., Hinrichs A., Hoffmann A. A. Increased damage from fires in logged forests during droughts caused by El Ni ıo [J]. *Nature*, 2001:414, 437–440.
- [16] Page S. E., Siegert F., Rieley J. O., Boehm H.-D. V., Jaya A., Limin S.. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997 [J]. *Nature*, 2002: 420, 61–65.
- [17] Pyne S. J., Andrews P. L. Introduction to wildland fire: fire management in the United States [J]. Wiley-Interscience, 1984.
- [18] Wang, H.-H., Finney, M. A., Song, Z.-L., Wang, Z.-S., Li, X.-C. Ecological techniques for wildfire mitigation: Two distinct fuelbreak approaches and their fusion [J]. *Forest Ecology and Management*, 2021:495, 119376.
- [19] 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*, 2019:133954.
- [20] Ryan K.C. Dynamic interactions between forest structure and fire behavior in boreal ecosystems [J]. *Silva Fennica*, 2002: 36 (1), 13–39.

- [21] Rothermel R., Deeming J. E. Measuring and Interpreting Fire Behavior for Correlation with Fire Effects [R]. General Technical Report, INT-93. Forest Service, USDA.1980.
- [22] Rowe L. S. Concepts of fire effects on plant individuals and species. The Role of Fire in Northern Circumpolar Ecosystems [C]. John Wiley & Sons, New York, 1983.
- [23] 张思玉, 蔡金榜. 杉木幼林地表可燃物含水率对主要火环境因子的响应模型 [J]. 浙江林学院学报, 2006: 23 (4), 439-444.
- [24] Alencar A., Nepstad D., Maria del Carmen Vera Diaz. Forest understory fire in the Brazilian Amazon in ENSO and no-ENSO years: Area burned and committed carbon emissions [M]. Earth Interactions, 2006: 10(6), 1-17.
- [25] 王文娟, 常禹. 大兴安岭呼中林区地表死可燃物含水量及其环境梯度分析 [J]. 生态系杂志, 2009: 28 (2), 209-215.
- [26] McLauchlan K. K., Higuera P. E., Miesel J. Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers [J]. Journal of Ecology, 2020: 5, 2047-2069.
- [27] 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):29.
- [28] 王海晖, 王振师, 李小川. 我国森林防火工作突出成就和核心管理机制 [J]. 森林防火, 2019:(03):1-8.
- [29] Pausas J. G., Parr C. L. Towards an understanding of the evolutionary role of fire in animals [J]. Evolutionary Ecology, 2018: 32, 113-125.
- [30] 胡海清. 林火生态与管理 [M]. 中国林业出版社, 北京. 2015.
- [31] Pierson D. N., Robichaud P. R., Rhoades C. C., Brown R. E. Soil carbon and nitrogen eroded after severe wildfire and erosion mitigation treatments [J]. International Journal of Wildland Fire, 2019: 28, 814-821.