



世界林业研究
World Forestry Research
ISSN 1001-4241, CN 11-2080/S

《世界林业研究》网络首发论文

题目: 澳大利亚桉树林火灾研究进展
作者: 张文文, 王秋华, 王睿琛, 龙腾腾, 魏建珩, 高仲亮
DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2021.0004.y
收稿日期: 2020-11-01
网络首发日期: 2021-02-02
引用格式: 张文文, 王秋华, 王睿琛, 龙腾腾, 魏建珩, 高仲亮. 澳大利亚桉树林火灾研究进展[J/OL]. 世界林业研究.
<https://doi.org/10.13348/j.cnki.sjlyyj.2021.0004.y>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

澳大利亚桉树林火灾研究进展*

张文文¹ 王秋华^{1,2} 王睿琛¹ 龙腾腾^{1,2} 魏建珩¹ 高仲亮^{1,2}

(1 西南林业大学土木工程学院, 昆明 650224; 2 云南省森林灾害预警与控制重点实验室, 昆明 650224)

摘要：森林火灾是全球范围内最为严重的自然灾害和突发性公共事件之一。随着全球极端天气事件的增加, 未来火风险总体上也将进一步提升, 极端大火的发生机制以及大火对生态的影响等也将会越来越受到关注。林火研究的主要驱动力主要包括植被特点(尤其是大面积人工林, 如桉树林等)、火灾风险评估和火前预防、火后恢复以及林火监测的现实需求等。文中从澳大利亚桉树林的火灾发生机制、林火对生态环境的影响、林火时空格局、火管理和火监测—预警—风险评估技术与方法等方面, 综述了 21 世纪以来澳大利亚桉树林火灾研究进展并展望了桉树林火灾未来研究的方向, 以期为我国桉树人工林的可燃物管理、林火监测与预警技术等提供借鉴。

关键词：桉树, 森林火灾, 火环境, 火灾风险评估, 火灾预警, 澳大利亚

中图分类号：S762 **文献标识码：**A

DOI：10.13348/j.cnki.sjllyj.2021.0004.y

Research Progress on *Eucalyptus* Forest Fire in Australia

Zhang Wenwen¹ Wang Qiuhua^{1,2} Wang Ruichen¹ Long Tengting^{1,2}

Wei Jianheng¹ Gao Zhongliang^{1,2}

(1 College of Civil Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2 Yunnan Key Laboratory of Forest Disaster Warning and Control, Kunming 650224, China)

Abstract: Forest fire is one of the most serious natural disasters and public emergencies in the world. With the increase of global extreme weather events, the fire risk in the future will be further improved. More and more attention will be paid to the mechanism of extreme fires and its impact on ecology. The main driving forces of forest fire research mainly include the vegetation characteristics (especially large-area plantation, such as eucalyptus forest), fire risk assessment and pre-fire prevention, post-fire recovery and the actual needs of forest fire monitoring. This paper reviews the research progress of *Eucalyptus* forest fire in Australia since the 21st century from the aspects of fire occurrence mechanism, impact on ecological environment, temporal and

*收稿日期：2020-11-01；修回日期：2021-01-28。

基金项目：国家自然科学基金“重大森林火灾驱动下滇中地区景观动态变化机制研究”(31960318)；
云南省农业联合面上项目“气候变化情景下的滇中地区森林可燃物动态调控机理研究”
(2018FG001-055)；云南省教育厅科学研究项目“景观廊道对重大森林火灾的影响机制研究”(2020Y0382)。

第一作者：张文文, 女, 河南周口人, 硕士生, 主要从事森林防火研究, E-mail: zww819794389@163.com。

通信作者：王秋华, 男, 福建长汀人, 教授, 主要从事森林防火研究, E-mail: qhwang2010@swfu.edu.cn。

spatial pattern of forest fire, fire management and fire monitoring early warning risk assessment technology and methods, and looks forward to the future research direction of Eucalyptus forest fire in Australia. In order to provide reference for fuel management, forest fire monitoring and early warning technology of *Eucalyptus* Plantation in China.

Keywords: *Eucalyptus*, forest fire, fire environment, fire risk assessment, fire warning, Australia

森林火灾是一种常见且危害巨大的自然灾害,人类活动和极端气候显著影响了林火的发生与分布,给全球生态环境带来了巨大影响^[1]。全球每年约发生 20 多万次森林火灾,因其突发性强、破坏性大、处置救助极为困难,始终是研究的热点^[2]。澳大利亚是大洋洲面积最大的国家,也是野火问题最严重的国家,每年平均有超过 5 万起野火,大约 0.5 亿 hm^2 的森林草地被野火烧毁^[3]。澳大利亚国土面积为 7.7 亿 hm^2 ,森林总面积约 1.25 亿 hm^2 ,覆盖率达 16.2%;草地面积近 6 亿 hm^2 ,覆盖率约 76%。草地与森林交错,多数草类生长状态一致且密集,枯死草类着火点低,易形成草地火,故澳大利亚草地与森林火灾相互影响。在澳大利亚天然林中,桉树是最主要的树种,占森林总面积的 75%;在人工林中,49%为阔叶树种(以桉树为主)^[4]。桉树是桃金娘科(Myrtaceae)桉属(*Eucalyptus*)植物的统称^[5],共有 806 个种、219 个亚种、5 个变种,绝大部分产于澳大利亚^[6-7]。我国最早于 1890 年从澳大利亚等国引种桉树,主要有大叶桉(*E. robusta* Smith)、细叶桉(*E. tereticornis* Smith)、柠檬桉(*E. citriodora* Hook.)和蓝桉(*E. globules* Labill.)等。现阶段,我国人工林面积约 0.693 亿 hm^2 ^[8],其中桉树人工林面积已达 0.045 亿 hm^2 ,占人工林总面积的 6.5%左右,主要分布于广西、广东、福建等地^[9]。桉树生长迅速,郁闭成林年限短,其枝、叶和树干含有大量油脂,叶革质不易腐烂,火灾发生频率高^[10]。了解澳大利亚桉树林火灾方面的相关研究,可为我国桉树林的可燃物管理、林火预警与监测技术、可持续经营管理、高效应急响应与处置等提供科学参考。

1 桉树林火灾发生原因

气候变化在全球尺度上已显著提高了野火风险,在干旱地区尤为显著^[11]。澳大利亚地处南半球,位于太平洋南部和印度洋之间,南回归线穿过澳大利亚中部,南回归线以北受副热带高压控制,盛行下沉气流,东有高大山脉阻挡,西岸又有西澳大利亚寒流经过,澳大利亚的气候类型呈半环状分布状态,日照充足,常年高温。沙漠面积占整个澳洲大陆面积的 20%以上,大陆蓄水能力极差,易形成干旱环境。澳大利亚常受厄尔尼诺现象影响,极端天气常现。Lim 等^[12]统计分析了过去 40 年的观测数据,确定了极端天气出现的另一个驱动因素——南极平流层极涡。在南半球春季,平流层极涡的减弱和增暖,极大地增加了澳大利亚东部亚热带地区出现干热极端气候的可能性。

受气候影响,澳大利亚植被分布也成半环状,由沿海向内陆逐渐过渡为森林带、草原带、荒漠带等。澳大利亚森林类型以阔叶林为主,林下植被丰富,形成了以桉树林为主的多层次的植物群落。桉树林是一个能适应火灾且具有高碳储量的森林系统^[13]。桉树树干上积聚的树皮致灾程度高,脱落的树皮和树干上表生枝叶创造了垂直连续的梯状可燃物,为树冠火创造了条件,导致火强度和扑灭难度加大^[14]。Ettchells 等^[15]调查了中强度火烧后的成熟桉树林,经计算发现,活树干上的树皮为每公顷的燃烧区提供了 5t 左右的可燃物。Williams 等^[16]研

究了澳大利亚东南部温带桉树林的火行为与物种多样性之间关系,结果显示,火灾状况受极端火灾天气发生率、着火概率、可燃物积累、生命史策略(如幼年期获得耐火性)等因素的制约。

火源就是热源,能为森林火灾的发生提供能量,主要分为自然火源与人为火源。Ganteaume 等^[19]研究发现,火灾燃烧持续时间受火源种类、大小、状态的影响,火源状态也会对引燃能力造成影响。近年来,人类活动成为了桉树林火灾发生的首要因素。此外,全球变暖增加了温带大气层闪电数量,干燥雷暴天气为桉树林火灾的自然、点燃和火灾演变提供了一个有利条件,“火鹰”(如黑鸢(*Milvus migrans*)、啸鸢(*Haliastur sphenurus*)、褐隼(*Falco berigora*))为捕猎而纵火,也都提高了野火风险^[17-18]。

2 桉树林火灾对生态环境的影响

火是一个干扰因子,会对生态系统造成积极或消极的影响,野火干扰强度和频率的增加正在推动桉树林生态系统的结构和功能发生重大变化^[20]。火灾通常对土壤沉积物的输送和侵蚀有较大影响, Sheridan 等^[21]通过研究澳大利亚东南部 2 片桉树林(面积分别为 136 hm² 和 24hm²,年均降雨量为 1900mm)自然集水区的径流量,发现火灾对林地土壤侵蚀有影响,在火灾发生后的较短时间内,土壤侵蚀率达到高峰值,且在火灾后 8~24 个月内,即火后植被恢复时期,降雨和径流对桉树林的土壤侵蚀开始发生转变。Prosser 等^[22-23]研究了野火对桉树林土壤侵蚀问题,确定了可能导致径流增加和加速侵蚀的火强度,高强度的火烧对林地的土壤侵蚀最严重。林火通过改变地表植被的状态,显著调控了景观及区域尺度的水文过程^[24]。Langford 等^[25]采用非参数统计方法详细分析了桉树火烧更新后的水文变化,发现火灾发生后大约 3~5 年,地表径流开始下降并低于灾前水平。

林火烧毁地表植被,释放大量温室气体、颗粒物和其他痕量气体,加剧空气污染,影响全球气候变化。Volkova 等^[26]在澳大利亚东南部桉树林中观测了火灾对碳的影响,发现粗木质可燃物对排放量有很大贡献。Lin^[27]全面整合了各种遥感、建模和气象数据集,以评估和量化森林火灾对环境大气的影响,气溶胶光学厚度和 PM_{2.5} 浓度等指标均显示,森林火灾后的环境质量变得更差。Wu 等^[28]通过分析野火灰烬中铅浓度和铅的同位素,发现悉尼附近一场野火产生的灰烬中铅浓度为 23mg/kg,且野火也会对遗留的工业铅沉积物进行再活化。目前,澳大利亚桉树林火灾的汞排放量被认为占全球汞排放总量的 1%~5%^[29]。

在长期的选择与进化过程中,森林生态系统已与火因子构成了一种协调平衡的关系,火成了多种植被类型赖以存续的关键因素。桉树林也在长期演化过程中形成了一系列的火适应性。Butler 等^[30]运用化学计量法对频发火灾的桉树林进行研究,发现林区内植被的养分循环同火灾发生与否有关,在化学计量模式下火对贫瘠区域植物群落的存续有重要影响。Barry 等^[31]研究发现,火灾后的桉树幼苗可在灰烬层和有机土壤层形成大量的外生菌根,在高强度的烧伤后仍生长旺盛。耐火桉树林是澳大利亚东南部主要的森林生态系统之一,对频发的高强度野火有较强的抵抗力。为了适应火灾,桉树将养分输送管道置于木质层深处,种子裹有木质果皮,只要树干的木心未被烧死,雨季一到,桉树又能重新成为优势物种。

3 桉树林火时空格局

遥感技术的应用不仅提高了对桉树林火灾的观测分辨率,而且也使林火时空格局更清晰。

Reddy 等^[32]收集了近 15 年来澳大利亚火场每日的 MODIS 数据，结合地理空间技术研究了森林火灾时空格局，结果发现，随着季节性天气模式的变化，澳大利亚各地森林火灾活动的高峰时间也各不相同（表 1）。在极端天气条件下，桉树林火灾燃烧的空间范围不均匀是由可燃物可燃性的可变性所驱动的。Cawson^[33]等利用燃烧数据建立了 logistic 回归模型，预测了时空尺度可燃物床层着火概率，确定了极端天气条件下可燃物床层不同属性与可燃性的影响机制。

表 1 澳大利亚重大森林火灾典型案例

地区	火灾高峰期	历史重大火灾	火险增加的原因
澳大利亚东南部	夏季和秋季	1983 年“灰烬星期三”， 1939 年“黑色星期五”	冷锋的移动导致炎热、干燥北风
新南威尔士州和昆士兰南部	春季—仲夏	2019 年“灾难性火灾”， 1994 年“东海岸火灾”， 1976 年“世界火海”	塔斯马尼亚岛附近的深低压系统形成干燥、强烈西风
西澳大利亚西北部和北部	冬季和春季	1978 年“丛林大火”	南澳上空的高压系统使得东南风向东北风增强
西澳大利亚州南部	春季和夏季	2009 年“黑色星期六”， 2016 年“Warooka 大火”	皮尔巴拉地区的高温引起热空气涌动形成大风

2019 年 10 月至 2020 年 2 月澳大利亚的跨年度灾难性火灾，让人类更加清晰地认识到野火对环境及气候的巨大影响。野火驱动的热对流能将燃烧产物提升到平流层，进而对平流层造成污染。植被受火烧历史和火行为的影响^[34]。Etchells 等^[16]调查了成熟桉树林，发现调查区平均树皮厚度（距地面 1.3m 处）大约是相邻森林中（7 年前经历过低强度火灾）树皮厚度的 2/3。为了描述和验证桉树林冠层结构指标在野火发生多年后的变化，Yogendra 等^[35]在 4 个不同火险等级的林地中进行了大范围的调查研究，利用多时相、小尺度激光雷达数据在空间尺度上对树冠冠幅、树冠高等指标进行了评价，发现大火使桉树林冠线产生了较大变化，缩小了林缘线。然而，不同强度野火对耐火林型林冠结构的影响机制研究尚不深入，在林冠结构动态评价和火灾后恢复方面还存在较大的理论空白。此外，对冠层结构的评估是一项复杂的任务，涉及到冠层在空间和时间上的水平垂直生长状态^[30]。

4 桉树林火管理

澳大利亚林火管理方式已从单一的灭火发展到可燃物管理，包括计划烧除、机械间伐、林分疏透、闭合的林火阻隔网、林缘可燃物处理^[36]。在景观尺度上，合理地对桉树进行疏伐抚育和经营规划可提高经济效益、维持生态价值、降低森林火灾风险。Volkova 等^[37]将机械间伐处理的桉树林与对照林比较发现，疏伐处理的林地地表可燃物火强度减少了近 30%，蔓延速度和火烧面积减少了约 20%。Grigg 等^[38]

建议不要在秋季疏伐后进行规定烧除，因为此时可燃物载量大、火险等级高，而应在疏伐前 1~2 年进行规定烧除，效果最佳。机械粉碎是降低森林地表有效可燃物载量和潜在野火危害的一种方法，使得可燃物易燃性和燃烧性大大降低，但粉碎可燃物的火强度还无法用火灾模拟软件进行预测^[39]。计划烧除可有效调控地表可燃物负荷量、降低桉树林火险等级，该措施对优化森林火灾管理制度至关重要^[40-41]。未来气候变化将会出现更长时间、更频繁的

极端高温,“灾难性”野火发生可能性增加,澳大利亚政府机构面临着不断扩大燃烧范围和缩短规定烧除周期的火管理压力^[42]。Muqaddas 等^[43]研究了周期性规定火烧对桉树林可燃物载量以及碳、氮循环的交互影响,发现周期为 4 年规定烧除可提高桉树林生态系统的生产力。

小尺度上试验研究的结果并不能满足大尺度(景观尺度)上可燃物处理的需求,因此森林景观模型成为开展可燃物处理试验、预测可燃物处理效果的有效工具^[44]。King 等^[45]利用一种基于动态过程的火行为和植被动力学模型 FIRESCAPE-SWTAS,模拟了规定烧除对桉树林的影响并确定了规定烧除与火灾分布、火灾面积、火灾次数之间的关系。Leon 等^[46]提出了一个多周期的可燃物管理模型,可生成一个动态景观镶嵌图,在满足生态系统要求的条件下,以最佳方式对林地内可燃物进行区域化分割,可降低可燃物的水平连续性。Gould 等^[47]开发并测试了一种燃料特性的快速视觉评估技术,该技术可为不同类别的直径小于 6 mm 的可燃物划分出了相应的危险等级,包括树皮、灌木、地表可燃物(森林垃圾),应用该技术评估了 2 个不同林分结构的桉树林可燃物,发现该技术描述的可燃物动态随时间变化的模式,与可燃物载量积累模型类似。

5 桉树林火监测—预警—风险评估技术

随着空间观测技术进步和计算能力不断提高,澳大利亚的林火监测、预警和风险评估技术已经进入了高分辨率和大数据时代。森林火险指数是森林防火和扑救的重要指标,可对火灾发生的可能性进行分级^[48]。Torres 等^[49]通过最小化 Kolmogorov-Smirnov 统计量,建立大面积森林火灾发生指数(*SeR*),发现 *SeR* 是一个能够提供有用信息的极端事件风险指数,具有一定的预测能力。飞火主要是指燃着的可燃物受火焰羽流或对流烟柱影响被抛至空中,在环境风的驱动下飞越到未燃的可燃物区,引燃细小可燃物产生新燃烧区的现象。飞火是由直径大于 2mm 的可燃物燃烧副产物碎片组成,其传播途径可被气象雷达观测到。在澳大利亚桉树林火灾中,飞火传播数千千米的现象常现。Mccarthy 等^[50]提出了一种基于 X 波段雷达数据的非监督式机器学习算法,在时间和空间上追踪飞火传播火种的模式特征,结果表明,野火确实会在雷达回波中产生特征信号,可用于判别飞火是否能引燃其他可燃物。

随着森林火灾多尺度模拟和多指标量化技术的提升,澳大利亚在林火蔓延模型与预警模型方面的研究日渐深入。火行为和火影响模型为火作为一种多用途森林管理工具提供了更好的研究手段。Almeida 等^[51]基于与气流有关的燃烧颗粒方位角 θ 和颗粒周围的流速(U)对桉树皮燃烧特性进行了研究,评估了桉树皮燃烧特性并提出了火蔓延经验模型(BRIND 模型),该模型是澳大利亚高海拔桉树林演替以及火灾响应的计算机模型,可模拟野火对桉树林的影响^[52]。Marques 等^[53]采用森林资源清查图与火烧迹地内的生物特征数据和火后评估相结合,基于 logistic 回归方法的 3 步建模策略,建立了桉树林林分的火后损伤和树木死亡率模型。损伤模型表明,林分的相对损伤率随林窗面积的增大而增大;死亡率模型表明,胸径大且处于林分优势种地位的树木不易死亡,森林管理者可以根据森林结构预测火灾后桉树的死亡率。

6 借鉴

在野火频发背景下,澳大利亚开发了多种火行为模型^[54](可预测蔓延率、火焰高度、火线强度等),建立了一套生物量方程组,能估算单株桉树的总生物量和组分生物量(树干、

树皮、树枝和树叶),也可换算出可燃物载量^[32]。在消防员的防护系统方面,澳大利亚将先进的 Karya 传感器集成在消防服中,用于实时监测单个消防员的的活动以及所在的火灾区域。在过去十几年里,通过火烧迹地实测、卫星遥感和模拟模型,我国在时空尺度上明确了火灾发生频率、区域火密度以及热点特征,积累了大量可燃物载量、燃烧面积和火险天气的样点数据^[55]。现阶段,中国将火源、火行为、植被、热力学和空气动力学融合为研究重点,在火生态、火管理方面取得了一定进展。如何更有效地降低桉树人工林火风险、高效应急响应与处置,是我国需要解决的问题。

1) 我国桉树人工林大多是纯林、单层林、同龄林,面积大且连续成片,有效可燃物载量大、连续性好,易发生高强度火灾。应借鉴澳大利亚可燃物管理技术,定期开展计划烧除,有效调控地表有效可燃物载量,降低火险等级。切断可燃物的水平与垂直连续性,清除梯状可燃物,防止树冠火,结合生物防火林带、防火道路工程等,将大面积人工林分成适当数量小区域,进行防火分区。结合森林抚育更新措施调整林分密度,及时清理林内及林缘可燃物,加强桉树人工林可燃物模型研究,为桉树林可燃物高效调控、火行为预报等提供有效工具。

2) 人类活动在时空尺度上影响着林火格局与分布,将来应制定统一的林火防控理论框架来描述和解释人类活动对林火的影响,把与人类相关的景观特征(道路、人类居住格局的特别结构和农田面积等)、生物特征(防火带面积和数量等)和森林火险气象指数纳入到林火管理实践中,使林火预测更准确,扑救更高效。

3) 中国应发挥独具特色的体制优势,建设适合中国林火现状的“预防为主、积极消灭”预防体系,加大救援力量投入,加强应急体系建设,理顺层级关系,科学指挥,安全扑救。借鉴澳大利亚林火预防与扑救的有益做法,引进、研发防火和灭火新装备与新技术,建立森林火灾数据共享平台与机构。

4) 近年来极端天气事件的增加,各生态系统对气候变化的响应不尽相同。若要降低桉树林火灾风险的不确定性,应了解变化的潜在驱动因素和机制,并基于可燃物的经验测量和实际野火分析等数据改进火行为模型。这些模型能更可靠地预测桉树林火灾的发生、发展与蔓延规律。可结合模型模拟结果提前制定火灾扑救预案,一旦着火,能高效、科学并安全扑救。

参 考 文 献

- [1] OLIVEIRA S, PEREIRA, JOSE M C, et al. Exploring the spatial patterns of fire density in Southern Europe using Geographically Weighted Regression[J]. *Applied Geography*, 2014, 51(2):143-157.
- [2] 魏书精,罗斯生,罗碧珍,等.气候变化背景下森林火灾发生规律研究[J].*林业与环境科学*,2020,36(2):133-143.
- [3] BAKER G B, WEBB A, WHITING P. Regulatory controls for buildings in wildfire-prone areas of Australia[J]. *Fire Technology*, 2020,56(3):1903-1935.
- [4] 朱敏慧, FEGELY R. 澳大利亚林业/林产品贸易概况及投资机遇[J].*木材工业*,2016,30(1):5-9.
- [5] 谢耀坚.中国桉树育种研究进展及宏观策略[J].*世界林业研究*,2011,24(4):50-54.
- [6] HILLK, JOHNSON L. Systematic studies in the eucalypts: 7. a revision of the bloodwoods,

genus *Corymbia* (Myrtaceae)[J]. *Telopea*, 1995, 6(2/3):185-504.

- [7]王豁然. 桉树生物学概论[M].北京: 科学出版社, 2010.
- [8]国家林业局.中国森林资源报告(2009-2013)[M].北京: 中国林业出版社, 2014.
- [9]谢耀坚.我国木材安全形势分析及桉树的贡献[J].桉树科技,2018,35(4):3-6.
- [10]白夜,朴金波.不同森林植被类型合成灭火技术分析[J].林业科技,2007,32(6):31-33.
- [11]JOLLY W M, HADLOW A M, HUGUET K. De-coupling seasonal changes in water content and dry matter to predict live conifer foliar moisture content[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2014, 23(4):480-489..
- [12]LIM E P, HENDON H H, THOMPSON D W J, et al. Australian hot and dry extremes induced by weakenings of the stratospheric polar vortex[J]. *Nature Geoscience*, 2019,12(4):896-901.
- [13]WOOD S W, HUA Q, ALLEN K J, et al. Age and growth of a fire prone Tasmanian temperate old-growth forest stand dominated by *Eucalyptus regnans*, the world's tallest angiosperm[J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 260(4):438-447.
- [14]MCCAW L, SIMPSON G, MAIR G. Extreme wildfire behavior in 3-year-old fuels in a Western Australian mixed *Eucalyptus* forest[J]. *Australian Forestry*, 1992,55(1):107-177.
- [15]ETCHELLS H, DONNELL A J, MCCAW W L, et al. Fire severity impacts on tree mortality and post-fire recruitment in tall eucalypt forests of southwest Australia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2020, 459(6):135-152.
- [16]WILLIAMS S, BRADSTOCK A. Fire regimes and the management of biodiversity in temperate and tropical eucalyptus forest landscapes in Australia[J]. *Cunninghamia*,2000, 5(2): 404-409.
- [17]ROMPS D M, SEELEY J T, VOLLARO D, et al. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming[J]. *Science*, 2014, 346(6211):851-854.
- [18]COUTO F T, LAKUNIN M, SALGADO R, et al. Lightning modelling for the research of forest fire ignition in Portugal[J]. *Atmospheric Research*, 2020,242(5):104-113.
- [19]GANTEAUME A, GUIJARRO M, JAPPIOT M, et al. Laboratory characterization of firebrands involved in spot fires[J]. *Annals of Forest Science*, 2011, 68(3):531-541.
- [20]BOWD E J, BANKS S C, STRONG C L, et al. Long-term impacts of wildfire and logging on forest soils[J]. *Nature Geoscience*, 2019,12(1):113-118.
- [21]SHERIDAN G J, LANE P N J, SHERWIN C B, et al. Post-fire changes in sediment rating curves in a wet *Eucalyptus* forest in SE Australia[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 409(2):183-195.
- [22]PROSSER I P, WILLIAMS L. The effect of wildfire on runoff and erosion in native *Eucalyptus* forest[J]. *Hydrological Processes*, 2015, 12(2):251-265.
- [23]THOMAS A D, WALSH R P D, SHAKESBY R A. Solutes in overland flow following fire in eucalyptus and pine forests, northern Portugal[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(5):1-15.
- [24]PELLEGRINI A F A, ANDEREGG W R L, PAINE C E T, et al. Convergence of bark investment according to fire and climate structures ecosystem vulnerability to future

- change[J]. Ecology Letters, 2017, 20(3):307-316.
- [25] LANGEORD K J. Change in yield of water following a bushfire in a forest of eucalyptus regnans[J]. Journal of Hydrology, 1976, 29(1/2):87-114.
- [26] VOLKOVA L, WESTON C. Measuring forest carbon and fire emission from southern *Eucalyptus* forests: key findings and some lessons learnt[C]. Bushfire CRC and AFAC 2013 Conference Research Forum, 2013.
- [27] YIN S, WANG X, GUO M, et al. The abnormal change of air quality and air pollutants induced by the forest fire in Sumatra and Borneo in 2015[J]. Atmospheric Research, 2020, 243(1):105-117.
- [28] WU L, TAYLOR M P, HANDELEY H K. Remobilisation of industrial lead depositions in ash during Australian wildfires[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599/600(6): 1233-1240.
- [29] HOWARD D, MACSWEEN K, EDWARDS G C, et al. Investigation of mercury emissions from burning of Australian eucalypt forest surface fuels using a combustion wind tunnel and field observations[J]. Atmospheric Environment, 2019, 202(8):17-27.
- [30] BUTLER O M, LEWIS T, Chen C. Prescribed fire alters foliar stoichiometry and nutrient resorption in the understorey of a subtropical eucalypt forest[J]. Plant and Soil, 2016, 410(1/2):1-11.
- [31] BARRY K M, NICHOLS S, JANOS D, et al. Can *Eucalyptus obliqua* seedlings grow well in forest soils not subjected to fire?[C]// Proceedings of the Joint Soil Science Australia and New Zealand Society of Soil Science Conference, Hobart, 2012: 339.
- [32] REDDY C S, BIRD N G, SREELAKSHMI S, et al. Identification and characterization of spatio-temporal hotspots of forest fires in South Asia[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 191(S3):791. DOI: 10.1007/s10661-019-7695-6.
- [33] CAWSON J G, DUFF T J. Forest fuel bed ignitability under marginal fire weather conditions in Eucalyptus forests[J]. International Journal of Wildland Fire, 2019, 28(3):198-204.
- [34] FENSHAM R J. Interactive effects of fire frequency and site factors in tropical *Eucalyptus* forest[J]. Austral Ecology, 2010, 15(3):255-266.
- [35] YOGENDRA K, KARNA L T, BENNETT. Assessing the legacy effects of wildfire on eucalypt canopy structure of south eastern Australia[J]. Biological and Ecological Engineering, 2018, 12(6):1-29.
- [36] WALKER S H, RIDEOUT D B, LOOMIS J B, et al. Comparing the value of fuel treatment options in northern Colorado's urban and wildland-urban interface areas[J]. Forest Policy and Economics, 2007, 9(6):694-703.
- [37] VOLKOVA L, BI H, HILTON J, et al. Impact of mechanical thinning on forest carbon, fuel hazard and fire behavior in Alpine ash forest (*Eucalyptus delegatensis*) of south eastern Australia[J]. Forest Ecology and Management, 2017, 405(9):92-100.
- [38] GRIGG A H, NORMAN M A, GRANT C D. Prescribed burning of thinning slash in regrowth

- stands of jarrah (*Eucalyptus marginata*) following bauxite mining in south-west Australia[J]. International Journal of Wildland Fire, 2010, 19(6):737-745.
- [39]BATTAGLIA M A, ROCCA M E, RHOADES C C, et al. Surface fuel loadings within mulching treatments in Colorado coniferous forests[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 260(9):1557-1566.
- [40]SLIJEPCEVICI A, MARSDEN-SMEDLEY J B. Fuel characteristics, low intensity burning and loss of carbon during regeneration burning in *Eucalyptus obliqua* wet forest at the Warra LTER site[C]. Forest Fire Research and Wildland Fire Safety, Portugal. 2002.
- [41]VOLKOVA L, WESTON C J. Effect of thinning and burning fuel reduction treatments on forest carbon and bushfire fuel hazard in *Eucalyptus sieberi* forests of South-Eastern Australia[J]. Science of The Total Environment, 2019, 94(6):1-9.
- [42]LIU Y, STANTURF J, GOODRICK S. Trends in global wildfire potential in a changing climate[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(4):685-697.
- [43]MUQADDAS B, LEWIS T. Temporal variations in litterfall biomass input and nutrient return under long-term prescribed burning in a wet sclerophyll forest, Queensland, Australia[J].The Science of the Total Environment, 2020, 706(1): 1-11.
- [44]HE H S, KEANE R E, IVERSON L R. Forest landscape models, a tool for understanding the effect of the large-scale and long-term landscape processes[J]. Forest Ecology and Management, 2008, 254(3):371-374.
- [45]KINGK J, CARY G J, BRADSTOCK R A, et al. Simulation of prescribed burning strategies in south-west Tasmania, Australia: effects on unplanned fires, fire regimes, and ecological management values[J]. International Journal of Wildland Fire, 2006, 15(4):527-540.
- [46]LEON J, REIJNDERS V M J J, HEARNE J W, et al. A landscape-scale optimisation model to break the hazardous fuel continuum while maintaining habitat quality[J]. Environmental Modeling & Assessment, 2018, 24(11):369-379.
- [47]GOULD J S, MCCAW W L, CHENEY N P. Quantifying fine fuel dynamics and structure in dry eucalypt forest (*Eucalyptus marginata*) in Western Australia for fire management[J]. Fuel and Energy Abstracts, 2011, 262(3):531-546.
- [48]WHITE B L A, WHITE L A S, GENESIO T R. Evaluation of forest fire danger indexes for eucalypt plantations in Bahia, Brazil[J]. International Journal of Forestry Research, 2015, 2015(1):1-6.
- [49]TORRES R, JUAN M. Index for the estimation of the occurrence of forest fires in large areas[J]. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 2020, 26(3):315-331.
- [50]MCCARTHY N F,GUYOTA, PROTAT, et al. Tracking pyrometeors with meteorological radar using unsupervised machine learning[J].Geophysical Research Letters, 2020, 47(8):226-234.
- [51]ALMEIDA M, VIEGAS D X, MIRANDA A I, et al. Effect of particle orientation and of flow velocity on the combustibility of *Pinuspinaster* and *Eucalyptus globulus* firebrand material[J]. International Journal of Wildland Fire, 2012, 20(8):946-962.

- [52]SHUGART H H, NOBEL I R. A computer model of succession and fire response of the high-altitude Eucalyptus forest of the Brindabella Range, Australian Capital Territory[J]. Austral Ecology, 2010, 6(2):149-164.
- [53]MARQUES S, GARCIA-GONZALO J, BORGES J G, et al. Developing post-fire *Eucalyptus globulus* stand damage and tree mortality models for enhanced forest planning in Portugal[J]. Silva Fennica, 2011, 45(1):69-83.
- [54]PLUCINSKI M P, SULLIVAN A L, RUCINSKI C J, et al. Improving the reliability and utility of operational bushfire behaviour predictions in Australian vegetation[J]. Environmental Modelling and Software, 2017, 91(5):1-12.
- [55]VAN L T T, VAND W G R, HOFFMAN A A, et al. Biomass burning fuel consumption rates: a field measurement database[J]. Biogeosciences, 2014, 11(24):7305-7329.