

DOI: 10.20103/j.stxb.202405161125

伊坤朋,包玉龙,殷帅,陈峰,于名召,姚启超,陈方,王明玉,刘晓东.碳中和愿景下我国野火信息化建设的机遇与挑战.生态学报, 2025, 45(19):

Yi K P, Bao Y L, Yin S, Chen F, Yu M Z, Yao Q C, Chen F, Wang M Y, Liu X D. Opportunities and challenges for developing wildfire information infrastructure in China under the carbon neutrality vision. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(19):

碳中和愿景下我国野火信息化建设的机遇与挑战

伊坤朋^{1,*}, 包玉龙², 殷 帅³, 陈 峰⁴, 于名召¹, 姚启超⁵, 陈 方^{3,6}, 王明玉^{7,8}, 刘晓东⁴

1 中国科学院生态环境研究中心, 区域与城市生态安全全国重点实验室, 北京 100085

2 内蒙古师范大学, 地理科学学院, 呼和浩特 010022

3 中国科学院空天信息创新研究院, 遥感与数字地球全国重点实验室, 北京 100101

4 北京林业大学, 生态与自然保护学院, 北京 100083

5 应急管理部灾害研究院, 森林草原防火研究中心, 北京 100085

6 可持续发展大数据中心, 北京 100094

7 中国林业科学研究院森林生态环境与自然保护研究所, 北京 100091

8 国家林业和草原局, 森林保护学重点实验室, 北京 100091

摘要:近年来,全球极端野火事件频发,给缓解气候变化与达成碳中和目标,带来严峻挑战。本文首先综述了全球野火的时空演变及其与气候系统的双向反馈机制,揭示野火在碳排放与生态演替中的重要作用。结合中国现有森林防火监测预警体系,分析了当前存在的多源信息分散、监测预警滞后、技术整合不足等瓶颈问题。针对上述问题,提出构建基于“空-天-地”多平台数据融合的一体化野火信息化框架,该框架由野火数据库、火险预警模块、实时监测模块、扑救指挥模块和灾损评估模块五大子系统组成,覆盖火前预测、火中监测、扑救调度与火后评估四种应用场景。各子系统通过统一数据标准与开放接口实现互联互通,并融合多源遥感数据、无人机航拍数据、物联网技术、5G 通信技术及人工智能算法,实现火情精准感知、蔓延态势分析和高效应急响应。同时,系统可量化估算火灾碳排放,为碳中和决策提供科学支持。所述信息化平台将显著提升我国野火风险管控能力与碳排放监测精度,为实现“双碳”目标和生态安全保障提供坚实的信息化支撑。

关键词:全球野火态势;野火管控;气候变化;火场监测;碳估算

Opportunities and challenges for developing wildfire information infrastructure in China under the carbon neutrality vision

YI Kunpeng^{1,*}, BAO Yulong², YIN Shuai³, CHEN Feng⁴, YU Mingzhao¹, YAO Qichao⁵, CHEN Fang^{3,6}, WANG Mingyu^{7,8}, LIU Xiaodong⁴

1 State Key Laboratory for Ecological Security of Regions and Cities, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China

3 Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Remote Sensing and Digital Earth, Beijing 100101, China

4 School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

5 Forest and Grassland Fire Research Center, Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, Beijing 100085, China

6 Big Data Center for Sustainable Development, Beijing 100094, China

7 Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFE0113900, 2023YFC3006804);中央高校基本科研业务费专项资金资助(BFUKF202317)

收稿日期:2024-05-16; **网络出版日期:**2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kpyi@rcees.ac.cn

8 Key Laboratory of Forest Protection, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China

Abstract: The unprecedented escalation in frequency and severity of extreme wildfires presents profound challenges to global climate-change mitigation and to the achievement of carbon neutrality. Recent analyses show that annual burned areas now approach 4 million km² and release roughly 7.3 billion tonnes of CO₂, equivalent to about 13 percent of anthropogenic emissions. Boreal and Mediterranean ecosystems in particular have experienced longer, more severe fire seasons in response to rising temperatures and prolonged drought, highlighting the urgent need for more adaptive monitoring and management approaches. In China, although considerable progress has been made in deploying satellite remote sensing, unmanned aerial systems, Internet of Things sensor arrays, 5G communications, and artificial intelligence analytics, these advances remain fragmented across airborne, spaceborne, and ground-based platforms. As a result, fire detection is often delayed, situational awareness varies throughout the fire lifecycle, and resource deployment remains suboptimal. Three principal challenges have been identified: the lack of unified data standards and interoperable interfaces; underutilization of high-resolution, real-time observations for precise fire-line mapping; and limited conversion of raw sensor outputs into actionable intelligence for incident command and post-fire evaluation. To overcome these shortcomings, we propose an integrated information-infrastructure framework comprising five interlinked modules that align with China's carbon neutrality vision. The first module is a centralized wildfire database that consolidates historical archives and live sensor feeds. The second module forecasts fire risk by synthesizing meteorological, vegetation, and topographical inputs into fine-scale hazard maps. The third module provides real-time monitoring through satellite thermal anomaly detection, unmanned aerial reconnaissance, and ground surveillance to achieve rapid perimeter delineation. The fourth module is a command and control platform offering interactive dashboards, AI-assisted decision-support for suppression tactics, and dynamic resource-allocation tools. The fifth module conducts damage assessment by applying burn severity mapping and carbon-emission quantification algorithms. These modules communicate via standardized data schemas and open application programming interfaces, enabling seamless cross-platform analytics. This unified approach enhances early detection accuracy, accelerates emergency response coordination, and improves the precision of carbon-emission estimates. Across the pre-fire, active-fire and post-fire stages, the system supports four operational scenarios: predictive risk assessment, real-time incident monitoring, suppression coordination and post-fire evaluation. Incorporating stakeholder training, iterative feedback loops, and compliance with international data-sharing protocols ensures continuous optimization of the infrastructure in step with emerging fire behavior research and technological innovation. By delivering precise situational awareness and robust decision support, this framework will bolster China's resilience to intensifying wildfire regimes and furnish the essential data and analytical tools needed to meet national carbon neutrality commitments.

Key Words: global wildfire trends; wildfire management; climate change; fire monitoring; carbon estimation

应对全球气候变化是目前人类面临的严峻挑战。为此,《巴黎协定》确立了将全球平均气温控制在较工业化前升温低于 2℃ 的目标,并为实现升温低于 1.5℃ 的目标而努力^[1]。二氧化碳(CO₂)贡献了约 66% 的全球暖化效应,被认为是大气中的首要温室气体。当前,降碳控温已成为是人类减缓气候变化的首要任务^[2],为此,我国在 2020 年第七十五届联合国大会郑重宣布了中国的双碳目标,即中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,CO₂排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。野火将陆地森林、草地、灌丛等自然生态系统从碳汇转变为碳源,是全球碳排放的主要自然源之一。2023 年全球过火面积达到 3.84 亿 hm²,大大高于此前的 2020 年(3.51 亿 hm²)、2021 年(3.54 亿 hm²)和 2022 年(3.29 亿 hm²)^[3]。全球野火释放大量 CO₂,2023 年全球野火碳排放量达到了 25.24 亿 t,其中 30% 来自加拿大创纪录的火灾季节^[3]。2023 年,全球平均 CO₂浓度已达到 419.3 × 10⁻⁶ mol/mol 的新高^[4]。部分野火专家认为,在全球气候变化的背景下,野火不会消失且极端野火仍会在森林、草原、灌丛等生态系统中高频发生,人类只能学

会如何与野火共存^[5-7]。美国的一项研究显示,人类目前无法有效控制野火发生,而且人类活动本身是野火肆虐的推动力量之一,该研究估算有 84% 的美国野火,是由于不适当的人类活动引燃的^[8]。本文旨在综述分析全球野火形势,特别关注碳中和愿景下,中国在野火管控上面临的挑战和技术进步带来的新机遇。

1 全球野火态势

1.1 全球野火面积总体下降,但森林火灾面积升高

基于遥感卫星对地球观测数据的综合评估显示,2001 年至 2019 年全球火烧迹地面积减少了 27%^[9]。这种下降趋势主要是北非大草原的野火下降所致,1998 年至 2015 年,北非的草原火灾面积下降了 41%^[10]。而森林火灾的火烧面积呈现显著的增加趋势^[11],与 2001 年相比,2019 年森林火灾的火烧面积增加了 3 万平方公里(面积大约相当于比利时的国土面积)^[11]。北半球森林火灾面积增加特别显著,美国西海岸的森林火灾面积在此期间增加了 49%^[11]。从全球尺度看,北方森林因火灾造成的森林损失比例最高(69%—73%),其次是亚热带(19%—22%)、温带(17%—21%)和热带森林(6%—9%)^[11]。2001 年至 2021 年间,全球年均野火烧毁陆地面积为 398 万 km²^[12],相当于 6 个法国的国土面积。2021 年全球森林火灾过火面积达到惊人的 9.3 万 km²,占当年发生的所有树木覆盖面积损失的三分之一以上。尽管 2022 年与上一年相比有所下降,但到 2023 年,世界各地的火灾活动再一次加剧,全球野火直接导致 250 多人死亡^[13]。

1.2 野火季延长,极端野火事件频发

基于全球气象数据的研究发现,从 1979 年到 2019 年,全球的平均年度火灾季节延长了 14d^[9]。极端火灾天气控制地表面积进一步扩大,1979 年全球 25% 的植被地表受极端火灾天气控制,而到 2020 年近一半植被地表受极端火灾天气威胁^[14],并且全球大多数生态系统的可燃物都呈现出强烈的干燥化趋势^[15]。夜光遥感卫星监测研究显示,全球变暖削弱了昼夜间的野火屏障,近 40 年来,夜间在燃野火时长增加 110h^[16]。火灾天气的扩张正在转化为真实的大规模野火事件。在美国,2018 年 6 月 11 日,雷击引发加州南部森林火灾,大火持续了四个月,烧毁了 5400hm² 的森林 2018 年 8 月,加州北部的两处山火汇合到了一起,形成门西多诺复合山火,过火面积接近 11.8 万 hm²。2018 年 11 月 8 日,加州北部尤比特县天堂镇爆发了该州史上最具破坏性的山火,造成 86 人死亡,200 余人失踪。据统计,在 2000—2020 年间,美国平均每年有 35 万套房屋被野火烧毁。而以上这些案例还不是最严重的事件,我们统计了 21 世纪以来全球的 14 场极端野火事件(>10000km²)(表 1)。

表 1 21 世纪以来全球极端火灾(>10000km²)列表

Table 1 List of extreme fires (>10000km²) globally since the 21st century

排名 Ranking	火灾 Wildfire	国家 Country	过火面积/km ² Burned area	参考文献 References
1	2002—2003 Australian bushfire season	澳大利亚	540000	[17]
2	2019—2020 Australian bushfire season	澳大利亚	398000	[18]
3	2021 Russia wildfires	俄罗斯	200000	[19]
4	2023 Canadian wildfires	加拿大	185000	[20]
5	2009 Black Saturday bushfires	澳大利亚	45000	[21]
6	2019 Siberia wildfires	俄罗斯	43000	[22—23]
7	2014 Northwest Territories fires	加拿大	35000	[24]
8	2020 California wildfires	美国	17800	[25]
9	2010 Bolivia forest fires	玻利维亚	15000	[26]
10	2011—2012 Australian bushfire season	澳大利亚	14000	[27—28]
11	2006—2007 Australian bushfire season	澳大利亚	13600	
12	2018 British Columbia wildfires	加拿大	13500	[29]
13	2017 British Columbia wildfires	加拿大	12000	[30]
14	2015 Russian wildfires	俄罗斯	11000	[31]

1.3 出现火灾难民,全球野火致病至死事件激增

自 1911 至 2021 年,全球共记录 470 余起造成至少 10 人以上死亡的野火事件,全球有记录记载的野火致死总计 4545 人,受伤 11379 人,全球野火导致的生态难民超过 1700 万人^[32]。2009 年,澳大利亚“黑色星期六”大火致死 180 人。2010—2019 年,中国因森林火灾导致的人员伤亡总数共计 607 人,每年都会有超 20 人在森林火灾中不幸罹难,其中,2010 年因森林火灾导致的伤亡人数高达 108 人^[33]。2019 年 3 月 30 日,四川凉山木里特大森林火灾,31 人不幸罹难。2023 年 7 月,希腊发生多起野火,导致 19000 多人从罗得岛撤离。2024 年 2 月,智利瓦尔帕莱索发生的野火造成 131 人死亡^[34]。在美国,2025 年洛杉矶山火造成 30 人死亡;2023 年,夏威夷大火(Maui Fire)致使 115 人死亡^[35];2018 年,营地大火(Camp fire)致使 88 人死亡。我们统计了截止 2025 年 4 月,全球直接致人死亡的野火事件(图 1),这只是全球有明确记录的极端野火致死事件。而在野火更加严重的非洲和东南亚等相对落后的国家和地区,火灾致死人数无法统计。野火烟雾特别对儿童、中老年人、孕妇,以及有肺部疾病的人危害巨大,会在短期内增加呼吸系统疾病的患病风险,如慢性支气管炎、肺气肿、慢性阻塞性肺疾病(COPD)等^[36-38]。森林大火产生的烟雾含有微小的固体物质颗粒(PM_{2.5}),易进入肺深部和血液中,导致整个呼吸系统受到烟雾的侵害^[39-40],造成肺部缺血缺氧,极易引起慢性阻塞性肺疾病(COPD),增加哮喘发病率,甚至死亡^[41-43]。一项研究公布了一个耸人听闻的数字,全球野火和农田秸秆焚烧的烟尘诱发死亡每年高达 339000 人^[44],受影响最严重的地区是撒哈拉以南非洲(157000 人)和东南亚(110000 人)。野火不仅威胁着人类,同时,也对野生动物产生致命的威胁。据统计,在国际自然保护联盟(IUCN)列为濒危的 29304 种陆地和淡水物种中,发现至少有 4403 个物种(15%)受到了野火的威胁^[45]。火灾活动的变化威胁到一系列代表性物种或多个地区评估的分类群,从鸟类、蜻蜓到哺乳动物均受到野火的威胁。野火焚烧植被,使一些动物面临被捕食的风险增加,饥饿和脱水构成潜在的致命威胁。在 2020 年巴西潘塔纳尔湿地的野火中,至少有 1695 万只脊椎动物直接被野火烧死^[46]。在澳大利亚,2019—2020 年的极端野火烧毁了 800 多种脊椎动物的栖息地,估计有 30 亿只个体受到影响,数百种物种因这个火灾季,而需要重新评估其种群数量和受协等级^[47]。

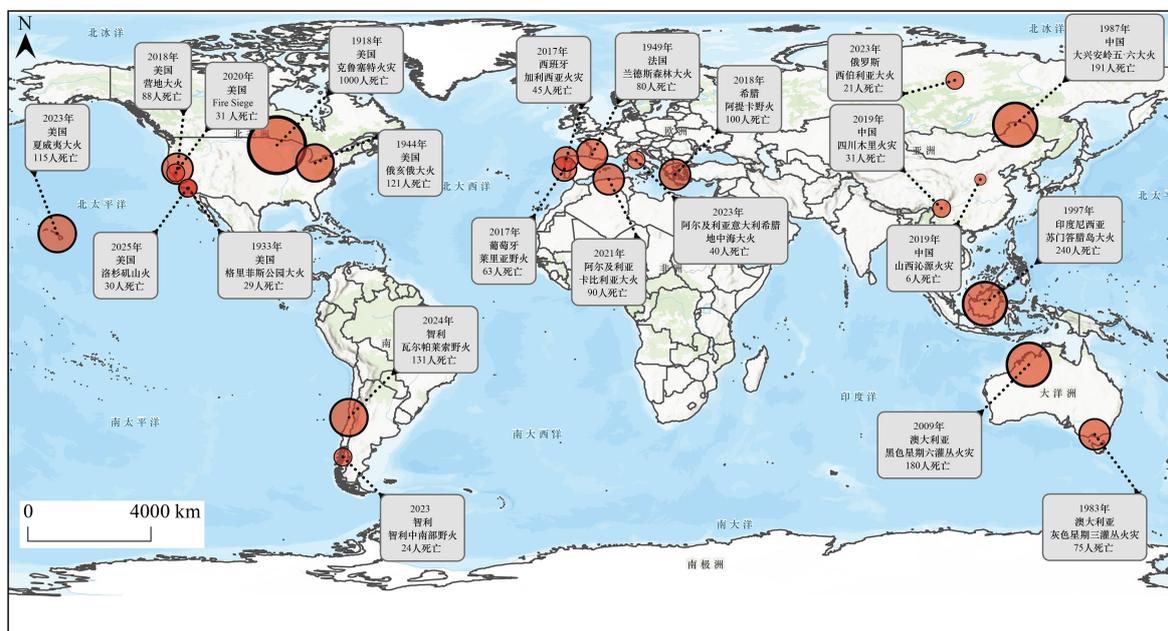


图 1 全球有记录的 22 起极端野火致死事件

Fig.1 Locations of 22 deadliest Wildfire Events in history

2 野火与气候形成双向互促的影响机制

2.1 气候变化对野火的影响

全球气候变化加剧野火肆虐。全球大气中的 CO_2 水平提高到工业革命前的 150%, 导致全球温度在过去一个世纪上升了 1.1°C 。预计到本世纪末, 全球温度可能上升 2.7°C 。全球气候变化增加了极端天气条件的频率和强度, 这些条件推动野火的发生和蔓延, 并导致通常不会燃烧的植被变干, 大大提升了可燃性(例如, 雨林、永久冻土和泥炭沼泽)^[48-51]。大尺度气候变化模式也导致天气模式的变化, 这些模式影响着年际至数十年尺度上的大气环流。厄尔尼诺通常会导致热带地区温度升高和降水减少, 在厄尔尼诺年份的燃烧面积都会激增, 例如, 2015 年至 2016 年间, 巴西亚马逊地区的火灾显著增加。同时, 野火在纬度地带性上向高纬度极地地区扩张^[52]。虽然, 人类试图遏制全球升温超过 1.5°C 的阈值, 但与工业化前相比, 北极多年平均气温上升已经超过了 2°C ^[53]。北极的变暖速度几乎是世界其他地区的两倍, 这种现象被称为北极放大^[53-54]。温度的升高使森林和苔原比几十年前更容易发生持续时间更长、范围更广的野火, 野火已出现在北纬 71° 的区域^[55-56]。在过去 40 年中, 北极的野火显示出极快的加速过程, 野火已经成为北极冻土融化的主要驱动力^[57]。在俄罗斯西伯利亚北极地区, 2020 年的火烧面积比 1982 年至 2020 年平均水平高出 7 倍, 对泥炭地的破坏面积达到了前所未有的程度^[58]。北极泥炭火灾中约有 70% 发生在过去 8 年, 30% 发生在 2020 年^[23]。野火也在垂直地带性上, 表现出向高海拔地区扩张的趋势。美国西部山区火灾危险程度呈现升高趋势, 在 2500—3000m 的高度区间中, 适宜发生大型火灾的天数增加最多, 从 1979 年到 2020 年增加了 63d^[59]。在中国, 青藏高原海拔 4000m 以上的西藏林芝和海拔 3000m 以上四川木里, 均出现了罕见的极端野火事件^[60]。2024 年 2 月, 贵州、云南等高海拔地区也出现了大面积森林火灾。

2.2 野火对气候变化的驱动

野火进一步加速全球气候变化(图 2)。野火塑造着陆地生态系统已长达 4 亿年, 深刻影响着生物圈、水圈、大气圈和岩石圈的生态系统过程和人类圈的生态环境^[53]。目前, 全球平均每年野火的过火面积仍高达 400 万 km^2 , 约占陆地植被覆盖面积的 3%。野火的发生改变了陆地生态系统与大气之间碳的短期和长期交换, 造成了区域内固碳等生态系统服务功能的剧烈扰动。一项基于加利福尼亚州野火的研究显示, 过火后的森林生态系统恢复至原有的固碳功能平均需要约 12 年^[61]。据估算, 2002 年至 2019 年间, 全球植被火烧(野火和秸秆焚烧)年均排放 (21 ± 2) 亿 t C ^[12, 62], 年均约排放 73.2 亿 t CO_2 ^[63]。IPCC 报告估算 2019 年的全球 CO_2 排放量达到 590 亿 t (IPCCAR6), 以此计算, 全球植被火烧 CO_2

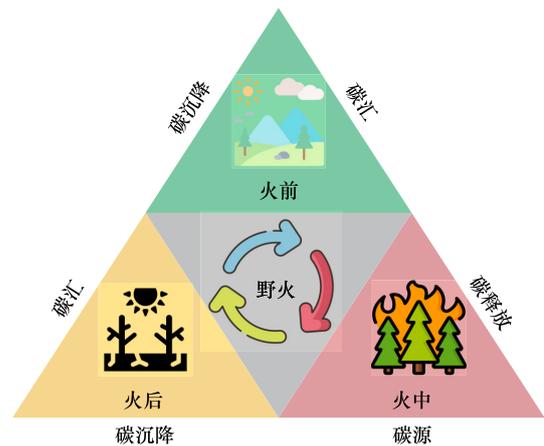


图 2 野火与气候的互促互促循环机制
Fig.2 Wildfire-climate feedback loop mechanisms

排放约占全球 CO_2 排放的 13%, 植被火烧已成为不容忽视的碳排放源。野火正在迅速蔓延到北方森林(北半球中高纬地区的森林区域), 北方森林火灾通常占全球火灾 CO_2 排放量的 10%。而在 2021 年, 北方森林火灾的 CO_2 排放量占全球火灾 CO_2 排放量的 23%(4.8 亿 t C)^[64]。森林、草原、农田秸秆等生物质资源的燃烧向大气中释放大量的气溶胶颗粒物(PM)和多种的痕量气体, 主要包括 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、一氧化碳(CO)、二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、氮氧化物(NO_x)、挥发性有机物(VOC_s)。植被火烧释放出来的这些气体和烟尘, 改变了区域大气的组成成分, 这种改变不但会加速区域气候升温, 甚至会进一步引发影响更为深远的全球气候变化和碳循环过程的扰动。有研究表明, 西伯利亚、阿拉斯加等高纬度地区北方林的季节性燃烧, 产生了大量的黑炭颗粒, 这些黑炭颗粒附着在北极冰川表面, 吸收更多的太阳辐射, 大大加快了北极冰川的融化速度。大气层

的输送和黑炭沉降会使冰雪减少反照率,加速北极和青藏高原的冰川融化,进而改变海平面高度和陆地地表径流。因此,如何有效应对生物质火烧,减少陆地生态系统碳排放,是世界各国在缓解全球气候变化过程中面临的巨大挑战。

3 中国野火信息化建设的挑战与机遇

3.1 野火监测和管控面临的挑战

提升火场感知能力,实时掌握森林草原火灾发生的地理位置、火场面积、蔓延情势以及火烧强度信息,对火灾扑救力量部署、应急决策实施,以及野火管理和预防尤为重要。然而,野火多发于边远的、道路稀疏、可达性极差的原始林区,在火灾发生的初期很难被发现,给野火预警和监测带来很大挑战。

当前,森林防火监测预警体系最主要的矛盾,是相对滞后和分散的监测预警能力,不能满足防火扑救对火前-火中-火后的预、控、灭、治、防、管的综合信息需求。依赖强大的制度优势,我国建立了响应速度快、综合扑救能力强的森林消防部队,在全球野火控制扑救能力上,我国综合水平名列全球前列。强在火情后端的兵力指挥扑灭,弱在火情前端的预防监测管控。火情监测预警能力不足、空天地的配合度不高、时空精细化程度低等弱项,使得我们对火情的掌握和防控存在时间差和信息差。既存的遥感卫星、无人机、监测视频、地面巡护等各类监测信息源,缺乏统一的标准,大量的散、乱、缓的异构数据成为多个“信息孤岛”。各省市信息化建设发展不平衡,存在低水平重复建设的情况,信息系统建设的规模和应用的范围有限,信息交互共享难以实现。在预警监测体系上,缺乏统一的、精准的野火监测预警平台,火险预报模型在市域和县域尺度上适应性不强,火险要素监测站视域半径小、密度低,建设标准不统一。目前,野火监测系统主要是提供卫星热点监测图片,只有热源像素点和概略坐标,空间分辨率为 1km^[65]。米级、亚米级高空间分辨率的卫星监测的空间覆盖度低,时效性不高^[65]。实时支持的指挥信息系统尚未建立,对现有的 5G、物联网技术、空天地(卫星-无人机-视频监控塔)等前沿技术,尚未实现在全国层面的有机整合,无法满足扑救指挥布控的综合信息需求,尚不具备实时态势感知(可视化、模拟推演)和火后可视化回溯复盘的能力。在火险预报上,主要是以气象为基础的概略预报,尚未实现以天气、林分构成、植被含水率等综合因素,精准预测到具体林区和具体点位,对森林防火灭火工作实际指导意义有限^[65]。我国既有野火基础监测网络能力,尚不能满足全疆域的火险预警、图像监控、视频调度、信息指挥等防火业务工作的需要,与信息化强国的总体要求不同步。因此,我们呼吁从全国层面,构建一个全疆域、全天候、全联接的一体化标准化监测预警平台,从多维度实现贯穿于火情事前、事中、事后全流程掌控的野火监测管控系统。

3.2 野火管理信息化建设的机遇

及时准确地掌握火灾的地理位置、火场面积、蔓延情势以及火烧强度信息,对火灾扑救力量部署、应急决策实施,以及野火管理和预防尤为重要。遥感卫星野火监测作为一种新的监测方法,已成为世界各国火点监测的重要手段之一,这种方法速度快、监测面积大,可随时掌握火发生、发展动态能准确定位火场边界、精确测得火烧迹地面积等^[66-67]。遥感是问题和应用驱动的科学,一系列遥感卫星传感器演替升级的过程,也充分的说明了这一点(表 2)。我国在遥感卫星对地监测、无人机监测、视频瞭望监测、云计算、物联网、人工智能、5G 数据通讯等领域的技术储备已经成熟,在国际上具备比较优势。但目前上述相对技术优势,只是部分地应用于扑救和信息支持,尚未得到有效整合形成一体化的野火监测预警管理系统。近 20 年来,我国风云系列、高分系列卫星在野火监测方面发挥了重大作用。美欧等发达国家依托哨兵(Sentinel)、葵花(Himawari)等遥感卫星数据,陆续建立了包含火点、火场面积等参数的野火监测管理系统,形成了具备全球监控的野火监测和火情信息管理的能力,且数据向全球开放(表 3)。2014 年,日本发射的新一代静止气象卫星的 Himawari-8,携带有分辨率为 2km 的中红外通道载荷,对火点等高温热点具有较好的反应,且观测时间间隔为 10 min,该数据对包括我国东部地区的东亚和大洋洲国家的火情监测具有十分重要的意义。相比之下,我国在野火监测管控信息化方面尚处于追赶趋势,应快速集成相关技术、整合国内外在遥感卫星和无人机监测领域的技术能力和数

据资源,构建一个全疆域、全天候、全联接的一体化标准化全国野火监测预警平台,着力打造“防患于未然”的能力,实现火险火情的高水平监测和高质量预警。

表 2 野火监测的遥感卫星及传感器

Table 2 Satellite sensor parameters and characteristics for wildfire monitoring

传感器 Sensor	卫星 Satellite	首发日期 Launch date	机构/组织 Agency	重访周期 Revisit frequency	空间分辨率 Spatial resolution	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	参考文献 References
OLS	DMSP(8-15)	1972	NOAA	1 d	560m	夜间观测,时间分辨率高	无白天对比数据	[68]
TM/ETM+/OLI	Landsat(5,7,8,9)	1972	USGS	16d	30m	长时间序列	时间分辨率低	[69]
AVHRR	NOAA(6-19)	1978	NOAA	1—2d	1.1km	可长时间序列	空间分辨率低	[70]
IMAGER	GOES(8-15)	1994	NOAA	30d	1km/4km/ 8km	时间分辨率高	空间分辨率低,像元亮温易饱和,2通道在335K饱和	[71]
VIRS	TRMM	1997	NASA	1—2d	—	—	—	[72]
VGT	SPOT(4-5)	1998/2002	ESA	1d	1km	空间分辨率高	—	[73]
MODIS	TERRA, AQUA	1999/2001	NASA	1d	250m/500m/ 1000m	易获取,时间、空间及光谱分辨率高	像元亮温易饱和,3.9 μ m波段在500K饱和,11 μ m波段在400K饱和	[74—75]
VIIRS	Suomi NPP/ NOAA-20	2011/2017	NASA/ NOAA	1d	400—800	高分辨率热红外图像,能够检测小型火灾和低热量火灾	更新频率较MODIS低	[76]
Himawari-8	Himawari-8	2014	JMA	10min	0.5—2km	时间分辨率高,地球同步,监测范围覆盖中国东部地区	空间分辨率低	[77]

OLS:线性扫描业务系统 Operational Linescan System; DMSP:美国空军国防气象卫星计划 Defense Meteorological Satellite Program; TM:专题制图仪 Thematic Mapper; ETM+:增强专题成像仪 Enhanced Thematic Mapper Plus; OLI:陆地成像仪 Operational Land Imager; AVHRR:先进甚高分辨率辐射计 Advanced Very High Resolution Radiometer; NPP:国家极地轨道伙伴卫星 National Polar-orbiting Partnership; NOAA:美国国家海洋和大气管理局 National Oceanic and Atmospheric Administration; VIRS:可见光与红外扫描仪 Visible and Infrared Scanner; VGT:植被传感器 Vegetation Instrument; MODIS:中分辨率成像光谱仪 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer; VIIRS:可见光红外成像辐射仪 Visible Infrared Imaging Radiometer Suite; GOES:地球同步运行环境气象卫星 Geostationary Operational Environmental Satellite; TRMM:热带降雨测量任务卫星 Tropical Rainfall Measuring Mission; SPOT:地球观测卫星 Satellite for Earth Observation; USGS:美国地质勘探局 United States Geological Survey; NASA:美国航空航天局 National Aeronautics and Space Administration; ESA:欧洲航天局 European Space Agency; JMA:日本气象厅 Japan Meteorological Agency

表 3 全球典型的野火监测系统和信息平台

Table 3 Typical systems and information platforms for global wildfire monitoring

数据库名称 Database name	简介 Description	网站链接 Website link
FIRMS (Fire Information for Resource Management System)	提供全球实时火灾监测和火情警报服务,基于NASA的MODIS和VIIRS数据。	https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/
Global Wildfire Information System (GWIS)	提供全球和区域尺度的火灾监测和风险评估,是UNEP和欧洲委员会联合研究中心的合作项目。	https://gwis.jrc.ec.europa.eu/
Global Forest Watch Fires (GFW Fires)	利用NASA的VIIRS和MODIS卫星数据提供全球实时野火监测和警报系统。	https://www.globalforestwatch.org/map/
Canadian Wildland Fire Information System (CWFIS)	提供加拿大和北美的野火情报,包括火灾监测、火险预测和季节性火灾评估。	https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/maps
European Forest Fire Information System (EFFIS)	提供关于欧洲野火的实时和历史数据,包括火灾危险预测和火灾影响评估,作为欧盟 Copernicus 计划的一部分。	https://effis.jrc.ec.europa.eu/

3.3 未来野火监测管控系统架构设想

加快大数据、物联网、区块链、人工智能等信息技术深度应用,强化综合集成,建设国家级火灾预防管理系统和灭火指挥通信系统,是国家提出的总体要求^[78]。我国在卫星遥感、无人机、5G 通讯、云计算、物联网、人工智能等领域有较为成熟的技术,在水利和生态环境部门得到了较为充分的应用,但在野火管理方面,各项技术在黑龙江、四川、云南等地开展了部分试验性应用,尚未充分整合到国家级的野火管理的业务流。面向未来的野火监测预警需求,应充分利用卫星遥感、云计算、物联网、人工智能、无人机、5G 通讯等先进技术,构建森林草原火灾空天地人一体化监测体系。基于火前-火中-火后的预警、扑控、治理的综合信息需求,构建一个全域、全天候、稳定的森林防火智能化监测预警平台。森林草原火灾监测管控系统平台,需要针对烟雾、火点、火线、火场等靶向目标进行动态监测,具备数据实时传输、多源数据实时融合、火场信息实时解译和扑救力量布局实时可视的能力。理想的全国野火监测预警平台将具备火灾风险预测、火灾实时监测、火灾蔓延模、火灾烈度评估拟等多目标功能,满足多情景的应用需求。全国野火监测预警平台要形成完备的灾前火险监测预警、灾中火情态势实时监测、灾后灾情评估三大体系,实现空天地协同的火险预警规范化、火灾态势实时可视化、灾情评估可量化的目标(图3)。

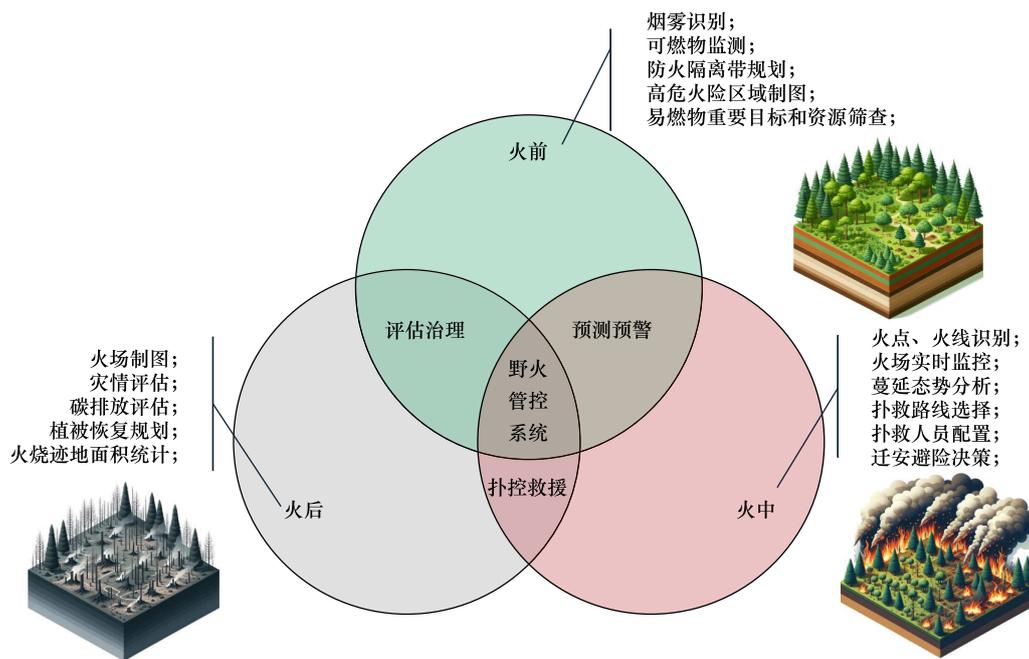


图3 野火监测管控系统架构概念示意图

Fig.3 Concept and function of fire watch system

3.4 野火监测管控系统的可能实现途径

拟建野火监测管控系统,应综合利用卫星通信技术、遥感技术、地理信息技术、无人机技术,来实现中国林业建设的信息化、数字化和智慧化,构建一个森林防火智能化监测预警系统平台。系统平台整体架构和技术路线设想如图4所示,应包括火灾数据库、火险预警子系统(火前)、森林火灾态势实时监测子系统、扑救指挥子系统(火中)、灾损评估子系统(火后)等5个部分。预期利用以上技术手段实现灾害预警、灾害应急监测、灾后评估等,全面提高森林火灾防治能力。利用AI技术,对无人机视频进行自动分析、识别,及时发现森林中的明火、烟雾等危险信号,并发出报警提醒,结合GIS实现危险区域定位。一旦发生火情,系统可以通过数据处理在第一时间实现精准的火点定位,提供防火隔离带的位置和防火能力。拟建系统平台的应用覆盖森林火灾预、控、灭、治、防的多个方面,包括森林火灾风险预测、森林火灾实时监测、森林火灾烈度评估、森林火灾蔓延模拟、多种森林火灾遥感产品的生产。火灾前,某特定森林区域在未来特定时间段发生森林火灾的可能

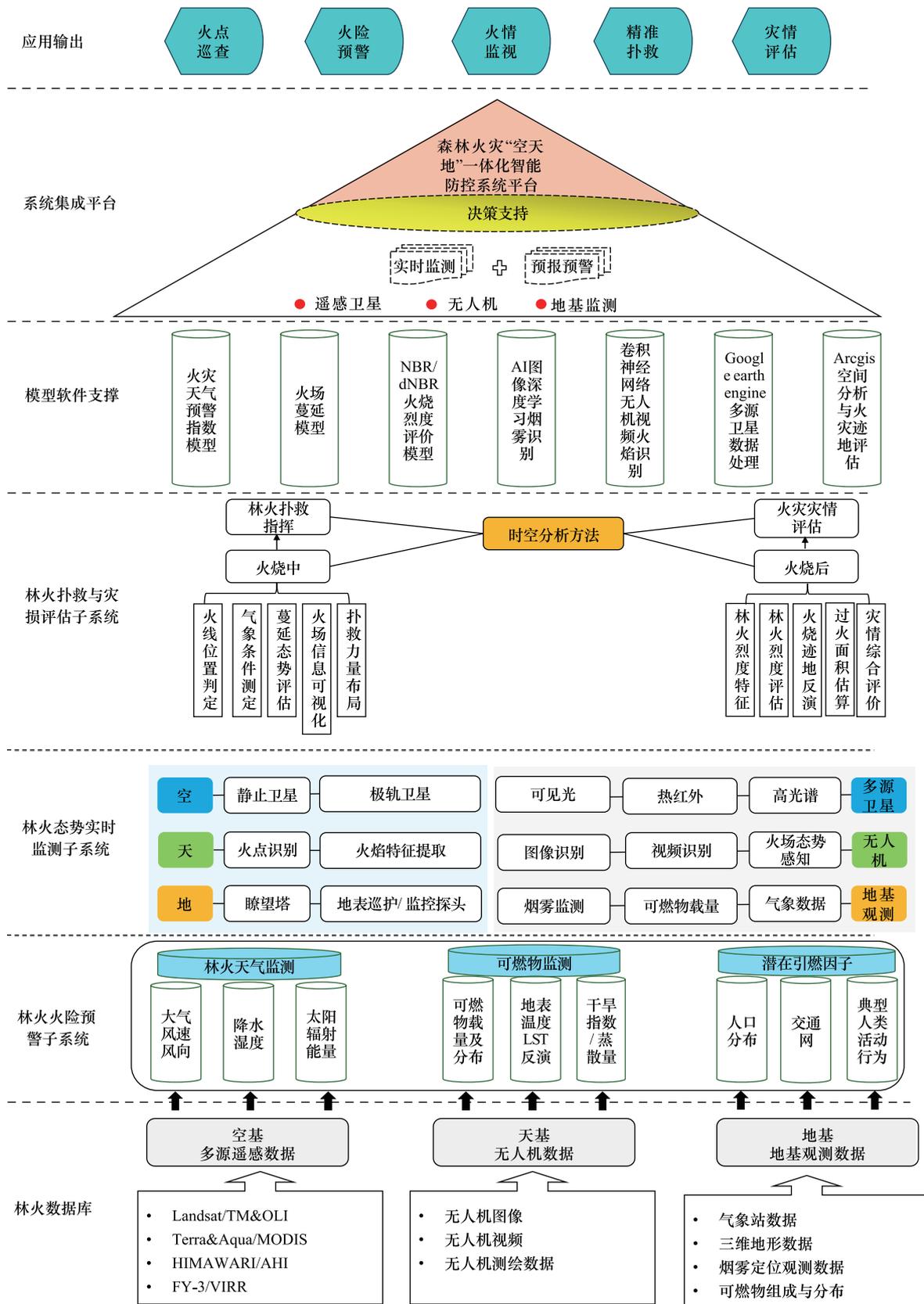


图 4 森林火灾监测管控系统平台架构设想

Fig.4 Architecture conceptualization of fire watch and management System

性(森林火灾风险预测);火灾中,针对森林火灾发生的地点、火势进行监测(森林火灾实时监测),有利于深化森林火灾发生的特征、格局、时空过程认识,指导森林火灾行为控制、扑灭措施,实现火场态势的实时感知;火灾后,定量评价森林生态系统的损害程度(森林草原火灾烈度评估,碳排放估算)(图4)。

4 结论

中国作为一个森林资源相对匮乏的国家,面临着严峻的野火防控挑战。本文全面分析了碳中和愿景下,全球野火态势以及中国野火信息化建设的机遇与挑战。本文认为,当前我国森林防火监测预警体系最主要的矛盾,是相对滞后和分散的监测预警能力,不能满足防火扑救对火前-火中-火后的预、控、灭、治、防的综合信息需求。许多国家对野火的响应滞后,付出的代价高昂,是由于野火管控重心侧重于事后处理,在规划、预防和信息化建设方面的投入不足。中国未来的野火管控和信息化建设,需要充分吸取国际上的教训,不仅在野火的扑救响应下功夫,更应在野火的管控的时间链条上将焦点前置,前瞻投资于野火信息化建设和野火预防。面向未来的野火监测与管控的特殊挑战,应结构化整合空基、天基、地基等野火监测系统的信息流,充分发挥我国在卫星遥感、云计算、物联网、人工智能、无人机等领域的技术优势,构建一个覆盖全疆域的一体化监测预警和管控平台,聚焦火场精准感知与有效管控两个目标,贯穿火前、火中、火后三个阶段,满足在预测预警、火场监测、扑救指挥、管理评估等四种情景的信息需求,实现火灾数据库、火险预警子系统、火灾态势实时监测子系统、扑救指挥子系统、灾损评估子系统等五个部分的有机组合,形成多要素、多过程、多尺度协同监测和管控体系。中国要尽快建立自上而下的一体化监测管控系统,全面提升对火场精准感知和对火情精细评估的能力,实现森野火信息化的高水平发展和高质量管控,为我国应对气候变化和实现双碳目标,提供信息和能力支撑。

参考文献(References):

- [1] Rogelj J, den Elzen M, Höhne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, Schaeffer R, Sha F, Riahi K, Meinshausen M. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. *Nature*, 2016, 534(7609): 631-639.
- [2] 于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 423-434.
- [3] Kolden C A, Abatzoglou J T, Jones M W, Jain P. Wildfires in 2023. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2024, 5(4): 238-240.
- [4] NOAA, No sign of greenhouse gases increases slowing in 2023. 2024. <https://research.noaa.gov/no-sign-of-greenhouse-gases-increases-slowng-in-2023>.
- [5] Moritz M A, Baillori E, Bradstock R A, Gill A M, Handmer J, Hessburg P F, Leonard J, McCaffrey S, Odion D C, Schoennagel T, Syphard A D. Learning to coexist with wildfire. *Nature*, 2014, 515(7525): 58-66.
- [6] Leys B A, Marlon J R, Umbanhowar C, Vannière B. Global fire history of grassland biomes. *Ecology and Evolution*, 2018, 8(17): 8831-8852.
- [7] Bowman D M J S, Balch J, Artaxo P, Bond W J, Cochrane M A, D'Antonio C M, Defries R, Johnston F H, Keeley J E, Krawchuk M A, Kull C A, Mack M, Moritz M A, Pyne S, Roos C I, Scott A C, Sodhi N S, Swetnam T W, Whittaker R. The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography*, 2011, 38(12): 2223-2236.
- [8] Balch J K, Bradley B A, Abatzoglou J T, Nagy R C, Fusco E J, Mahood A L. Human-started wildfires expand the fire niche across the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(11): 2946-2951.
- [9] Jones M W, Abatzoglou J T, Veraverbeke S, Andela N, Lasslop G, Forkel M, Smith A J P, Burton C, Betts R A, van der Werf G R, Sitch S, Canadell J G, Santín C, Kolden C, Doerr S H, Le Quéré C. Global and regional trends and drivers of fire under climate change. *Reviews of Geophysics*, 2022, 60(3): e2020RG000726.
- [10] 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, Mangeon S, Melton J R, Yue C, Randerson J T. A human-driven decline in global burned area. *Science*, 2017, 356(6345): 1356-1362.
- [11] Tyukavina A, Potapov P, Hansen M C, Pickens A H, Stehman S V, Turubanova S, Parker D, Zalles V, Lima A, Kommareddy I, Song X-P, Wang L, Harris N. Global trends of forest loss due to fire from 2001 to 2019. *Frontiers in Remote Sensing*, 2022, 3: 825190.
- [12] Kelly L T, Fletcher M S, Oliveras Menor I, Pellegrini A F A, Plumanns-Pouton E S, Pons P, Williamson G J, Bowman D M J S. Understanding fire regimes for a better anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, 2023, 48: 207-235.

- [13] MacCarthy J R, Tyukavina S, Weisse M, Harris N. The latest data confirms: forest fires are getting worse. World Resources Institute, 2023.
- [14] Jain P, Castellanos-Acuna D, Coogan S C P, Abatzoglou J T, Flannigan M D. Observed increases in extreme fire weather driven by atmospheric humidity and temperature. *Nature Climate Change*, 2022, 12(1): 63-70.
- [15] Ellis T M, Bowman D M J S, Jain P, Flannigan M D, Williamson G J. Global increase in wildfire risk due to climate-driven declines in fuel moisture. *Global Change Biology*, 2022, 28(4): 1544-1559.
- [16] Balch J K, Abatzoglou J T, Joseph M B, Koontz M J, Mahood A L, McGlinchy J, Cattau M E, Williams A P. Warming weakens the night-time barrier to global fire. *Nature*, 2022, 602(7897): 442-448.
- [17] Ellis S, Kanowski P, Whelan R. National inquiry on bushfire mitigation and management. Canberra: Council of Australian Governments, 2004.
- [18] Adams M, Neumann M. Australian bush fires and fuel loads. *Nature*, 2021, 597(7874): 31.
- [19] Voronova O S, Gordo K A, Zima A L, Feoktistova N V. Strong wildfires in the Russian federation in 2021 detected using satellite data. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, 58(9): 1065-1076.
- [20] Livingston, I., Canada's astonishing and record fire season finally slows down, in *The Washington Post*. 2023. <https://www.washingtonpost.com/weather/2023/10/18/canada-historic-2023-wildfire-season-end/>
- [21] Whittaker J, Haynes K, Handmer J, McLennan J. Community safety during the 2009 Australian 'black Saturday' bushfires: an analysis of household preparedness and response. *International Journal of Wildland Fire*, 2013, 22(6): 841.
- [22] Kharuk V I, Ponomarev E I, Ivanova G A, Dvinskaya M L, Coogan S C P, Flannigan M D. Wildfires in the Siberian taiga. *Ambio*, 2021, 50(11): 1953-1974.
- [23] Irannezhad M, Liu J G, Ahmadi B, Chen D L. The dangers of Arctic zombie wildfires. *Science*, 2020, 369(6508): 1171.
- [24] Scholten R C, Jandt R, Miller E A, Rogers B M, Veraverbeke S. Overwintering fires in boreal forests. *Nature*, 2021, 593(7859): 399-404.
- [25] Keeley J E, Syphard A D. Large California wildfires: 2020 fires in historical context. *Fire Ecology*, 2021, 17(1): 22.
- [26] Silveira M V F, Silva-Junior C H L, Anderson L O, Aragão L E O C. Amazon fires in the 21st century: the year of 2020 in evidence. *Global Ecology and Biogeography*, 2022, 31(10): 2026-2040.
- [27] Sharples J J, Cary G J, Fox-Hughes P, Mooney S, Evans J P, Fletcher M S, Fromm M, Grierson P F, McRae R, Baker P. Natural hazards in Australia: extreme bushfire. *Climatic Change*, 2016, 139(1): 85-99.
- [28] Yu P, Xu R B, Abramson M J, Li S S, Guo Y M. Bushfires in Australia: a serious health emergency under climate change. *The Lancet Planetary Health*, 2020, 4(1): e7-e8.
- [29] Tymstra C, Stocks B J, Cai X L, Flannigan M D. Wildfire management in Canada: review, challenges and opportunities. *Progress in Disaster Science*, 2020, 5: 100045.
- [30] Daniels L D, Gray R W, Burton P J. 2017 megafires in British Columbia: urgent need to adapt and improve resilience to wildfire. In: Hood S M, Drury S, Steelman T, Steffens R, editors. *Proceedings of the Fire Continuum-Preparing for the future of wildland fire; 2018 May 21-24; Missoula, MT. Proceedings RMRS-P-78. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2020: 51-62.*
- [31] Liesowska A. Fire rages on as death toll from two blazes reaches 33. Available online; <http://siberiantimes.com/ecology/casestudy/news>, 2015.
- [32] Hussein, M.H.a.M. Mapping wildfires around the world. 2021.
- [33] 马世雯, 刘昱圻, 朱瑾奕, and 张海芳, 数说中国森林火灾十年探索防治在路上. 2021, 澎湃新闻.
- [34] Jones M W, Kelley D I, Burton C A, Di Giuseppe F, Barbosa M L F, Brambleby E, Hartley A J, Lombardi A, Mataveli G, McNorton J R, Spuler F R, Wessel J B, Abatzoglou J T, Anderson L O, Andela N, Archibald S, Armenteras D, Burke E, Carmenta R, Chuvieco E, Clarke H, Doerr S H, Fernandes P M, Giglio L, Hamilton D S, Hantson S, Harris S, Jain P, Kolden C A, Kurvits T, Lampe S, Meier S, New S, Parrington M, Perron M M G, Qu Y, Ribeiro N S, Saharjo B H, San-Miguel-Ayanz J, Shuman J K, Tanpipat V, van der Werf G R, Veraverbeke S & Xanthopoulos G. State of Wildfires 2023—2024. *Earth System Science Data*, 2024, 16(8): 3601-3685.
- [35] Chow F K, Yu K A, Young A, James E, Grell G A, Csiszar I, Tsidulko M, Freitas S, Pereira G, Giglio L, Friberg M D, Ahmadov R. High-resolution smoke forecasting for the 2018 camp fire in California. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2022, 103(6): E1531-E1552.
- [36] Reid C E, Brauer M, Johnston F H, Jerrett M, Balmes J R, Elliott C T. Critical review of health impacts of wildfire smoke exposure. *Environmental Health Perspectives*, 2016, 124(9): 1334-1343.
- [37] Black C, Tesfaigzi Y, Bassein J A, Miller L A. Wildfire smoke exposure and human health: Significant gaps in research for a growing public health issue. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2017, 55: 186-195.
- [38] Haikerwal A, Akram M, Del Monaco A, Smith K, Sim M R, Meyer M, Tonkin A M, Abramson M J, Dennekamp M. Impact of fine particulate matter (PM_{2.5}) exposure during wildfires on cardiovascular health outcomes. *Journal of the American Heart Association*, 2015, 4(7): e001653.
- [39] Aguilera R, Corringham T, Gershunov A, Benmarhnia T. Wildfire smoke impacts respiratory health more than fine particles from other sources: observational evidence from Southern California. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1493.

- [40] Liu J C, Pereira G, Uhl S A, Bravo M A, Bell M L. A systematic review of the physical health impacts from non-occupational exposure to wildfire smoke. *Environmental Research*, 2015, 136: 120-132.
- [41] Aguilera R, Corringham T, Gershunov A, Benmarhnia T. Wildfire smoke impacts respiratory health more than fine particles from other sources: observational evidence from Southern California. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1493.
- [42] Bowman D M J S, Williamson G J, Abatzoglou J T, Kolden C A, Cochrane M A, Smith A M S. Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(3): 58.
- [43] Xu R B, Yu P, Abramson M J, Johnston F H, Samet J M, Bell M L, Haines A, Ebi K L, Li S S, Guo Y M. Wildfires, global climate change, and human health. *New England Journal of Medicine*, 2020, 383(22): 2173-2181.
- [44] Johnston F H, Henderson S B, Chen Y, Randerson J T, Marlier M, Defries R S, Kinney P, Bowman D M J S, Brauer M. Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. *Environmental Health Perspectives*, 2012, 120(5): 695-701.
- [45] Kelly L T, Giljohann K M, Duane A, Aquilué N, Archibald S, Batllori 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.
- [46] Tomas, W.M., C.N. Berlinck, R.M. Chiaravalloti, G.P. Faggioni, C. Strüssmann, R. Libonati, C.R. Abrahão, G. do Valle Alvarenga, A.E. de Faria Bacellar, F.R. de Queiroz Batista, T.S. Bornato, A.R. Camilo, J. Castedo, A.M.E. Fernando, G.O. de Freitas, C.M. Garcia, H.S. Gonçalves, M.B. de Freitas Guilherme, V.M.G. Layme, A.P.G. Lustosa, A.C. De Oliveira, M. da Rosa Oliveira, A. de Matos Martins Pereira, J. A. Rodrigues, T.B.F. Semedo, R.A.D. de Souza, F.R. Tortato, D.F.P. Viana, L. Vicente-Silva, and R. Morato, Distance sampling surveys reveal 17 million vertebrates directly killed by the 2020's wildfires in the Pantanal, Brazil. *Scientific Reports*, 2021. 11(1): p. 23547.
- [47] Nimmo D G, Andersen A N, Archibald S, Boer M M, Brotons L, Parr C L, Tingley M W. Fire ecology for the 21st century: conserving biodiversity in the age of megafire. *Diversity and Distributions*, 2022, 28(3): 350-356.
- [48] Stephens S L, Collins B M, Fettig C J, Finney M A, Hoffman C M, Knapp E E, North M P, Safford H, Wayman R B. Drought, tree mortality, and wildfire in forests adapted to frequent fire. *BioScience*, 2018, 68(2): 77-88.
- [49] Liu J C, Mickley L J, Sulprizio M P, Dominici F, Yue X, Ebisu K, Anderson G B, Khan R F A, Bravo M A, Bell M L. Particulate air pollution from wildfires in the western US under climate change. *Climatic Change*, 2016, 138(3): 655-666.
- [50] Stevens-Rumann C S, Kemp K B, Higuera P E, Harvey B J, Rother M T, Donato D C, Morgan P, Veblen T T. Evidence for declining forest resilience to wildfires under climate change. *Ecology Letters*, 2018, 21(2): 243-252.
- [51] Sun Q H, Miao C Y, Hanel M, Borthwick A G L, Duan Q Y, Ji D Y, Li H. Global heat stress on health, wildfires, and agricultural crops under different levels of climate warming. *Environment International*, 2019, 128: 125-136.
- [52] Aubry-Wake C, Bertonicini A, Pomeroy J W. Fire and ice: the impact of wildfire-affected albedo and irradiance on glacier melt. *Earth's Future*, 2022, 10(4): e2022EF002685.
- [53] Loehman R A. Drivers of wildfire carbon emissions. *Nature Climate Change*, 2020, 10(12): 1070-1071.
- [54] Scholten R C, Coumou D, Luo F, Veraverbeke S. Early snowmelt and polar jet dynamics co-influence recent extreme Siberian fire seasons. *Science*, 2022, 378(6623): 1005-1009.
- [55] McCarty J L, Smith T E L, Turetsky M R. Arctic fires re-emerging. *Nature Geoscience*, 2020, 13(10): 658-660.
- [56] Abbott B W, Jones J B, Schuur E A G, Chapin F S, Bowden W B, Bret-Harte M S, Epstein H E, Flannigan M D, Harms T K, Hollingsworth T N, Mack M C, McGuire A D, Natali S M, Rocha A V, Tank S E, Turetsky M R, Vonk J E, Wickland K P, Aiken G R, Alexander H D, Amon R M W, Benscoter B W, Bergeron Y, Bishop K, Blarquez O, Bond-Lamberty B, Breen A L, Buffam I, Cai Y H, Carcaillet C, Carey S K, Chen J M, Chen H Y H, Christensen T R, Cooper L W, Cornelissen J H C, de Groot W J, DeLuca T H, Dorrepaal E, Fetcher N, Finlay J C, Forbes B C, French N H F, Gauthier S, Girardin M P, Goetz S J, Goldammer J G, Gough L, Grogan P, Guo L D, Higuera P E, Hinzman L, Hu F S, Hugelius G, Jafarov E E, Jandt R, Johnstone J F, Karlsson J, Kasischke E S, Kattner G, Kelly R, Keuper F, Kling G W, Kortelainen P, Kouki J, Kuhry P, Laudon H, Laurion I, MacDonald R W, Mann P J, Martikainen P J, McClelland J W, Molau U, Oberbauer S F, Olefeldt D, Paré D, Parisien M A, Payette S, Peng C H, Pokrovsky O S, Rastetter E B, Raymond P A, Reynolds M K, Rein G, Reynolds J F, Robards M, Rogers B M, Schädel C, Schaefer K, Schmidt I K, Shvidenko A, Sky J, Spencer R G M, Starr G, Striegl R G, Teisserenc R, Tranvik L J, Virtanen T, Welker J M, Zimov S. Biomass offsets little or none of permafrost carbon release from soils, streams, and wildfire: an expert assessment. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(3): 034014.
- [57] Gibson C M, Chasmer L E, Thompson D K, Quinton W L, Flannigan M D, Olefeldt D. Wildfire as a major driver of recent permafrost thaw in boreal peatlands. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 3041.
- [58] Descals A, Gaveau D L A, Verger A, Sheil D, Naito D, Peñuelas J. Unprecedented fire activity above the Arctic Circle linked to rising temperatures. *Science*, 2022, 378(6619): 532-537.

- [59] Alizadeh M R, Abatzoglou J T, Adamowski J, Modaresi Rad A, AghaKouchak A, Pausata F S R, Sadegh M. Elevation-dependent intensification of fire danger in the western United States. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 1773.
- [60] 饶月明, 王川, 黄华国. 联合多源遥感数据监测四川木里县森林火灾. *遥感学报*, 2020, 24(5): 559-570.
- [61] Hemes K S, Norlen C A, Wang J A, Goulden M L, Field C B. The magnitude and pace of photosynthetic recovery after wildfire in California ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(15): e2201954120.
- [62] van Wees D, van der Werf G R, Randerson J T, Rogers B M, Chen Y, Veraverbeke S, Giglio L, Morton D C. Global biomass burning fuel consumption and emissions at 500 m spatial resolution based on the Global Fire Emissions Database (GFED). *Geoscientific Model Development*, 2022, 15(22): 8411-8437.
- [63] 刘志华, 贺红土, 徐文茹, 梁宇, 朱教君, 王高峰, 魏伟, 王自发, 韩永明. 林火碳排放的影响与减缓对策. *中国科学院院刊*, 2023, 38(10): 1552-1560.
- [64] Zheng B, Ciais P, Chevallier F, Yang H, Canadell J G, Chen Y, van der Velde I R, Aben I, Chuvieco E, Davis S J, Deeter M, Hong C P, Kong Y W, Li H Y, Li H, Lin X, He K B, Zhang Q. Record-high CO₂ emissions from boreal fires in 2021. *Science*, 2023, 379(6635): 912-917.
- [65] 闫鹏, 赵彦飞. 新发展阶段我国森林大火巨灾风险对策研究. *今日消防*, 2021, 6(9): 4-7.
- [66] Sunar F, Özkan C. Forest fire analysis with remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(12): 2265-2277.
- [67] Roy D P, Boschetti L, Smith A M S. Satellite remote sensing of fires. In: Belcher C M, Rein G, editors. *Fire phenomena and the earth system: an interdisciplinary guide to fire science*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2013: 77-94.
- [68] Kiran Chand T R, Badarinath K V S, Krishna Prasad V, Murthy M S R, Elvidge C D, Tuttle B T. Monitoring forest fires over the Indian region using Defense Meteorological Satellite Program-Operational Linescan System nighttime satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 103(2): 165-178.
- [69] Röder A, Hill J, Duguay B, Alloza J A, Vallejo R. Using long time series of Landsat data to monitor fire events and post-fire dynamics and identify driving factors. A case study in the Ayora region (eastern Spain). *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(1): 259-273.
- [70] Sannier C A D, Taylor J C, Du Plessis W. Real-time monitoring of vegetation biomass with NOAA-AVHRR in Etosha National Park, *Namibia*, for fire risk assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(1): 71-89.
- [71] Zhang X Y, Kondragunta S. Temporal and spatial variability in biomass burned areas across the USA derived from the GOES fire product. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 2886-2897.
- [72] Christopher S A, Chou J, Zhang J L, Li X, Berendes T A, Welch R M. Shortwave direct radiative forcing of biomass burning aerosols estimated using VIRS and CERES data. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(15): 2197-2200.
- [73] Eastwood J A, Plummer S E, Wyatt B K, Stocks B J. The potential of SPOT-Vegetation data for fire scar detection in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(18): 3681-3687.
- [74] Giglio L. Detection, evaluation, and analysis of global fire activity using MODIS data. University of Maryland, College Park, 2006.
- [75] Giglio L, Loboda T, Roy D P, Quayle B, Justice C O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(2): 408-420.
- [76] Schroeder W, Oliva P, Giglio L, Csizsar I A. The New VIIRS 375m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 143: 85-96.
- [77] Wickramasinghe C, Wallace L, Reinke K, Jones S. Intercomparison of Himawari-8 AHI-FSA with MODIS and VIIRS active fire products. *International Journal of Digital Earth*, 2020, 13(4): 457-473.
- [78] 中共中央办公厅; 国务院办公厅, 关于全面加强新形势下森林草原防灭火工作的意见. 2023. https://www.gov.cn/zhengce/2023-04/20/content_5752410.htm