



青藏高原东缘“魔鬼火灾季”的驱动因子

史腊梅¹, 姚启超^{1*}, Peter BROWN²

1. 国家自然灾害防治研究院森林草原防灭火研究中心, 北京 100085

2. Rocky Mountain Tree-Ring Research, Fort Collins, CO 80526, USA

* 通讯作者, E-mail: qichao.yao320@gmail.com

2025-05-27收稿, 2025-11-24修回, 2026-01-06接受, 2026-02-26网络版发表

国家自然科学基金项目(32471883、32201573)和应急管理部国家自然灾害防治研究院基本科研业务专项项目(ZDJ2025-30)资助

摘要 森林火灾是最具破坏性的自然灾害之一, 对生态系统稳定性、人类社会安全和区域经济造成深远影响。近年来, 随着极端热浪事件频率的显著增加, 青藏高原东缘成为我国森林火灾风险最为突出的区域之一。尤其在每年三月的“魔鬼火灾季”, 多起极端森林火灾造成重大人员伤亡和严重生态破坏。本文以青藏高原东缘三起典型重特大森林火灾为研究对象, 基于多时间尺度的气象数据和火灾记录资料, 系统揭示了极端火行为的气象触发机制及长期控火政策对可燃物积累的影响。在月尺度上, 高饱和水汽压差与持续干旱为“魔鬼火灾季”火灾的频发提供了极为有利的气象背景; 在日和小时尺度上, 气温骤升、相对湿度降低以及风速和风向突变是极端火行为爆发的关键触发因素。长期气候变暖叠加严格控火政策导致森林可燃物持续积累, 从而加剧了极端火行为的风险。研究表明, 未来应采取更加平衡的火灾管理策略, 以降低森林火灾风险并保护消防人员生命安全。研究成果为青藏高原东缘的森林防灭火政策优化及可燃物精细化管理提供了科学支撑。

关键词 森林火灾, 驱动因子, 控火政策, 青藏高原东缘

1 引言

森林火灾是地球上最具破坏性的自然灾害之一, 对生态系统、气候系统以及人类社会可持续发展构成严重威胁(Bowman等, 2017)。近几十年来, 全球范围内森林火灾的频率、规模和强度显著上升(Jolly等, 2015; Goss等, 2020), 澳大利亚2019–2020年的“黑色夏季”丛林大火以及2025年初加利福尼亚的森林火灾事件, 均凸显了极端火灾对人类社会与基础设施的灾难性影响(Godfree等, 2021; Orison, 2025)。这些灾害事件不仅反映了气候变化驱动下火灾风险的上升趋势, 也揭示出全球在理解重特大森林火灾的成因及防控机制方面存在较大空白(重大森林火灾指受害森林面积在100 ha以上1000 ha以下的, 或者死亡10人以上30人以下的, 或者重伤50人以上100人以下的森林火灾; 特大森林火灾指受害森林面积在1000 ha以上的, 或者死亡30人以上的, 或者重伤100人以

上的森林火灾)(https://www.gov.cn/gongbao/content/2008/content_1175820.htm)。

青藏高原东缘地形复杂、气候垂直分异显著, 是我国森林火灾最为集中的高风险区域之一(Xiong等, 2020)。受复杂地形、多样气候与人类活动交互影响, 该地区在三月“魔鬼火灾季”频繁发生多起造成重大人员伤亡的极端森林火灾。例如, 2019年3月30日凉山州木里县火灾造成30名消防员牺牲, 过火面积约47 ha(卢逸致, 2023); 2020年同一天, 凉山州西昌市再次发生森林火灾, 过火面积达3048 ha, 致19名消防员遇难(张展, 2020)。2024年3月15日, 甘孜州雅江县发生了一场历史罕见的森林火灾, 此次火灾烧毁了超过20000 ha的土地(曾鹏和程雪力, 2024), 直接波及11个村、1个社区, 共3396名居民。这些火灾事件在时间与空间上的高度集中表明, 青藏高原东缘三月火灾活动存在特定的气象与生态条件耦合机制, 其研究具有突出的科学与现实意义。

中文引用格式: 史腊梅, 姚启超, Brown P. 2026. 青藏高原东缘“魔鬼火灾季”的驱动因子. 中国科学: 地球科学, 56(4): 1315–1323, doi: [10.1360/N072025-0241](https://doi.org/10.1360/N072025-0241)

英文引用格式: Shi L, Yao Q, Brown P. 2026. Driving factors of “evil fire season” in the eastern edge of the Tibetan Plateau. Science China Earth Sciences, 69(4): 1273–1281, <https://doi.org/10.1007/s11430-025-1821-6>

已有研究表明, 火灾活动受气象条件(Chen等, 2015)、植被类型(Ruffault和Mouillot, 2017)、地形特征(Su等, 2019)及人类活动(Abatzoglou和Williams, 2016)等多因子共同影响。气象因子通过调节植被生产力(可燃物载量)、火灾季长度(可燃物易燃性)以及火势蔓延速度(传播速率), 在火灾形成与蔓延中起决定作用(Zhao和Liu, 2021)。然而, 尽管国内已有关于气候变化与火灾活动的长期趋势研究(Yao等, 2017; Zhao和Liu, 2019; Alexandro等, 2020), 针对极端火行为的短时气象触发机制与长期政策干预效应的量化分析仍较为缺乏(Field等, 2009; Peterson等, 2015)。青藏高原东缘近期连续发生的多起重特大森林火灾, 为揭示跨时间尺度驱动因子的复合作用提供了理想的自然实验。

中国自1987年以来长期实施的严格控火政策, 在有效减少火源、降低火灾次数的同时, 也引发了新的生态问题。持续数十年的积极灭火措施导致林下可燃物大量积累, 使森林生态系统处于高可燃物、高风险的潜在状态(Marlon等, 2012)。这种“可燃物积累效应”与气候变暖趋势相叠加, 同时, 森林-城镇交界域的不断扩张进一步提高了火灾暴露度和风险(Yao等, 2024), 三者的复合作用极大放大了火灾发生时的破坏力。特别是在地形起伏剧烈、气象条件复杂的青藏高原东缘地区, 火灾风险的累积性特征尤为突出。

因此, 本文基于青藏高原东缘三起典型重特大森林火灾, 采用多时间尺度分析框架, 旨在: (1) 识别该区域极端森林火灾在月、日、小时尺度上的关键气象驱动因子; (2) 量化长期控火政策与气候变化共同作用下的可燃物积累效应; (3) 为国家应急和林草部门制定以可燃物管理为核心的综合火灾防控策略提供科学依据。本研究的目标是揭示青藏高原东缘极端火行为的内在机制, 支撑区域火灾风险的精准评估与政策优化。

2 数据和方法

2.1 研究区

本研究聚焦于四川省西部地区(图1A紫色曲线所示), 该区域位于青藏高原东缘, 地形起伏剧烈, 海拔普遍超过3500 m, 整体呈西北-东南向延伸。根据地形切割深度可分为高山原与高山峡谷两类。区内河流发育, 包括金沙江、大渡河与雅砻江等, 河流切割出来的高山峡谷地形形成显著的垂直气候分带特征, 表现为从河谷亚热带到山地寒温带再到高山寒带的梯度过渡(Shen等, 2022)。此类复杂的山地峡谷地貌不仅增强了焚风效应并加剧干热气候, 同时也为火势传播提供了类似“烟囱效应”的动

力条件。此外, 该区域植被类型多样, 以高山针阔混交林为主, 生物多样性极为丰富(Xing和Ree, 2017)。正是这种地形复杂、气候多变与生态多样的综合特征, 使该区域在气候变化和人类活动的共同影响下成为火灾高敏感区(Su等, 2019), 给火灾监测、控制与扑救带来了巨大挑战。

2.2 火灾数据

年际和月尺度的森林火灾次数和受害森林面积数据来源于国家统计局编制的《中国统计年鉴》, 该数据由地方应急与林草部门逐级上报, 内容包括火灾次数、受害森林面积、起火原因、人员伤亡及扑救经费等(网络版附表S1和S2)。

此外, 本文利用火灾烟尘影像来确定火行为突变时间, 并通过火烧斑块影像计算过火面积。火灾烟尘影像数据获取自高分四号卫星(Chen等, 2018), 在ArcGIS中将波段4(红)、波段3(绿)和波段2(蓝)进行合成而生成真彩色影像。火烧斑块提取使用哨兵2号卫星数据(Stavrakoudis等, 2020), 通过将红外波段(波段8)、红波段(波段4)和绿波段(波段3)进行合成而生成假彩色影像, 以增强对植被变化的识别。使用ArcGIS的空间统计工具进行几何分析, 计算实际过火面积。

2.3 气象参数

月尺度气象变量包括最高温($T_{\max}$)、降水量、925 hPa高度层的温度日较差(DTR)以及自校准帕默尔干旱指数(scPDSI), 数据来源于CRU TS 4.08数据集(Osborn等, 2021)。水汽压差(VPD)基于欧洲中期天气预报中心第五代再分析资料(ECMWF/ERA5)925 hPa高度层的月平均温度(T)和相对湿度(RH)数据进行计算(Hersbach等, 2020), 计算公式如下:

$$\text{VPD} = 0.61078 \times e^{\frac{17.27 \times T}{T + 237.3}} \times (1 - \text{RH}) \quad (1)$$

日尺度气象变量, 包括地表2 m的 $T_{\max}$ 、925 hPa高度层的RH以及地表10 m的风速, 均来源于ECMWF/ERA5的逐小时数据集。温度和风速取24小时内的最大值, 相对湿度取24小时内的最小值。

所有数据集的时间范围为1953–2023年, 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 。

2.4 地形和植被因子

地形参数基于日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)先进陆地观测平台(ALOS)提供的30 m数字高程模型(DEM)(Das等, 2014), 利用ArcGIS计算坡度、地形起

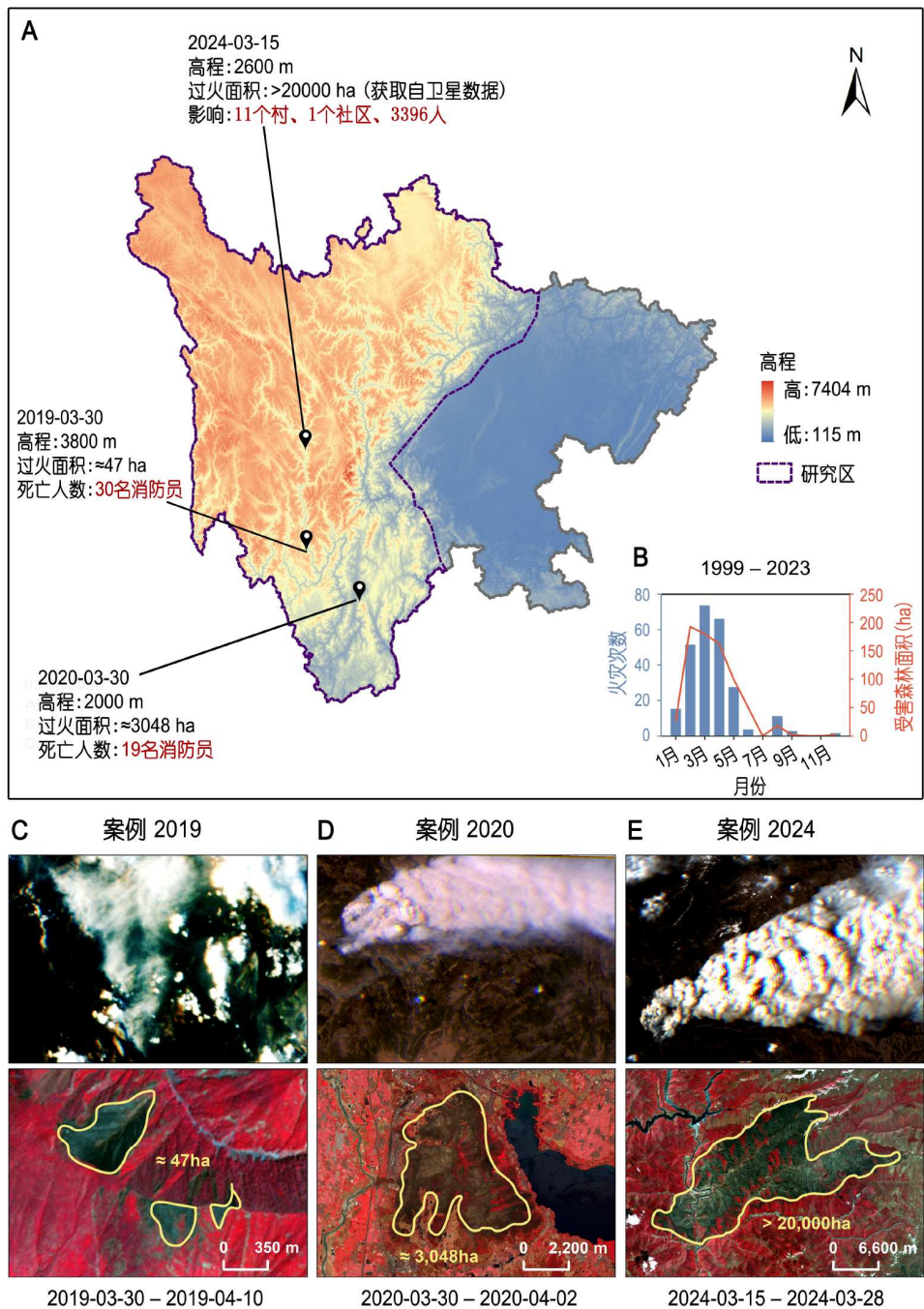


图 1 青藏高原东缘三起重特大森林火灾案例。(A) 火灾发生位置、日期、海拔、过火面积及伤亡情况；(B) 1999–2023年四川省森林火灾的月均火灾次数和过火面积；(C) 2019年3月30日森林火灾的高分四号真彩色影像与哨兵二号假彩色火烧斑块图；(D) 2020年3月30日森林火灾的高分四号真彩色影像与哨兵二号假彩色火烧斑块图；(E) 2024年3月15日森林火灾的高分四号真彩色影像与哨兵二号假彩色火烧斑块图。黄色曲线标注区域为火烧斑块范围

伏度、地表切割深度、地表粗糙度、高程变异系数及剖面曲率，将上述参数通过线性加权求和的方法计算得到地形复杂度指数(Huang等，2020)。

为评估控火政策对可燃物积累的影响，本文采用总初级生产力(GPP)、归一化植被指数(NDVI)、森林面积

和森林蓄积数据来分析可燃物载量的变化。月尺度的GPP和NDVI分别来自中分辨率成像光谱仪(MODIS)的MOD17A2H和MOD13A3数据集(Huete等，1999)，时间跨度为2001–2024年，空间分辨率为1 km。森林面积和森林蓄积数据采用国家森林资源连续清查结果(网络版附表

S3)(国家林业和草原局, 2019), 该清查每五年进行一次, 涵盖九个清查时期: 1973–1976年、1977–1981年、1984–1988年、1989–1993年、1994–1998年、1999–2003年、2004–2008年、2009–2013年及2014–2018年。

2.5 火灾驱动因子的多时间尺度分析

本文选取2019年3月30日、2020年3月30日和2024年3月15日三起极端森林火灾, 从月、日和小时三个时间尺度分析其气象驱动特征。在月尺度上, 重点考察 $T_{\max}$ 、scPDSI、RH、VPD、DTR、平均海平面气压(MSLP)、位势高度(GP)、降水量、GPP和对流有效位能(CAPE)等变量的变化特征与火灾发生规律的一致性; 在日尺度上, 比较火灾发生前后关键气象变量的时序异常; 在小时尺度上, 结合高分四号与葵花八号卫星数据, 识别火行为突变时刻, 解析风速与风向突变对火行为的触发作用, 从而揭示极端火灾的动力学机制。

2.6 长期控火政策影响分析

为探讨长期控火政策与气候变化交互影响下的火灾演化特征, 本文基于1953–2023年四川省火灾记录, 采用突变点检测与相关分析方法识别火灾次数与过火面积的变化转折点。通过皮尔逊相关与 t 检验($P<0.05$)评估火灾与气象因子的显著性关联, 并进一步结合国家森林资源连续清查数据与卫星观测资料, 量化控火政策导致的可燃物积累效应及其对极端火行为的放大作用。由于现有的森林火灾数据集、火灾管理政策以及森林资源数据均为省级尺度, 且四川省(研究区所在省份)的森林火灾集中分布在青藏高原东缘(网络版附图S1), 该区域的气候变化趋势与全省整体趋势一致。因此, 这一部分采用四川省的数据进行长时间尺度分析。

3 结果

3.1 火灾时空特征

青藏高原东缘三起重特大森林火灾均集中发生于三月(图1A), 1999–2023年历史数据也显示三月为火灾高发期(图1B), 此现象与该地区独特的地形和气候特征密切相关。研究区位于中国地形最复杂的区域(网络版附图S2), 复杂的地形结构通过两种机制显著增强火灾风险: 其一, 地形焚风效应形成典型的干热河谷气候, 导致三月异常温暖干燥(网络版附图S2), 此类气象条件通过增强可燃物干燥度和易燃性, 显著提高了火灾发生概率; 其二, 陡峭地形与强对流天气协同作用(网络版附图S2), 产生显著“烟囱效应”, 进一步放大火行为强度。当火灾

发生时, 地形结构迫使受热地表空气快速上升, 形成较高的压力梯度, 将富氧空气持续输送至火焰核心。结合该地区极高的可燃物载量(网络版附图S2), 此类过程持续推动燃烧发展, 最终引发极具破坏性的爆发性火行为(图1C–1E)。此类火行为不仅显著加快火势蔓延速度, 也极大增加了扑火人员的安全风险(Viegas和Simeoni, 2011; Page和Butler, 2018)。

3.2 “魔鬼火灾季”的多时间尺度驱动因子

月尺度分析结果显示, 三月VPD值最高、scPDSI值最低(雅江县除外, 该地scPDSI在十月最低, 但在三月仍为负值, 图2D)。VPD作为直接影响可燃物含水量的关键变量, 其升高表征可燃物更为干燥、易燃; scPDSI则综合反映环境干旱程度, 其偏低指示更为严重的干旱状态。此外, GPP在三月迅速上升(图2D), 表明植被进入生长季初期, 此物候转换阶段伴随植被生物量显著增加, 为火灾燃烧提供了丰富的可燃物基础。因此, 高VPD、严重干旱及可燃物增加的协同作用, 共同构成了三月重特大森林火灾发生的有利环境背景。

在日尺度上, 针对三起火灾发生时段的气象要素分析表明, $T_{\max}$ 和RH异常最具统计学显著性。在火灾发生期间, $T_{\max}$ 持续高于20℃, 最高可达28℃, 同时RH显著下降(图2C)。反映出温度和湿度对火险等级的关键调控作用。

进一步基于小时尺度的分析揭示了极端火行为的触发机制。借助高分四号与葵花八号卫星的高时间分辨率观测, 研究精确识别了火行为发生突变的具体时间(图2A和网络版附图S3)。分析结果表明, 风速突增或风向突变是火行为剧烈增强的直接触发机制。在2019年和2024年的案例中, 火行为突变主要由风速骤增引起; 而2020年的案例中则由风向突变主导(图2B)。表明风场变化是“魔鬼火灾季”极端火行为的核心中尺度驱动因子, 该结论与Goss等(2020)的研究结果相一致。

3.3 控火政策对火灾与气候关系的影响

自1987年实施严格的控火政策以来, 四川省的森林火灾频次与气候驱动因子之间出现明显的“解耦”现象。控火政策实施前, 受害森林面积与 $T_{\max}$ 呈显著正相关($R=0.50$, $P<0.01$), 与scPDSI呈显著负相关($R=-0.43$, $P<0.01$); 控火政策实施后, 上述相关性均不再显著($P>0.1$), 说明政策干预改变了火灾与气候的直接响应关系。该“解耦效应”在过去三十多年中持续存在, 尽管年 $T_{\max}$ 呈持续上升趋势, 但火灾频次和过火面积均明显低于政策实施前的水平(图3A和3B)。这表明控火政策在一定

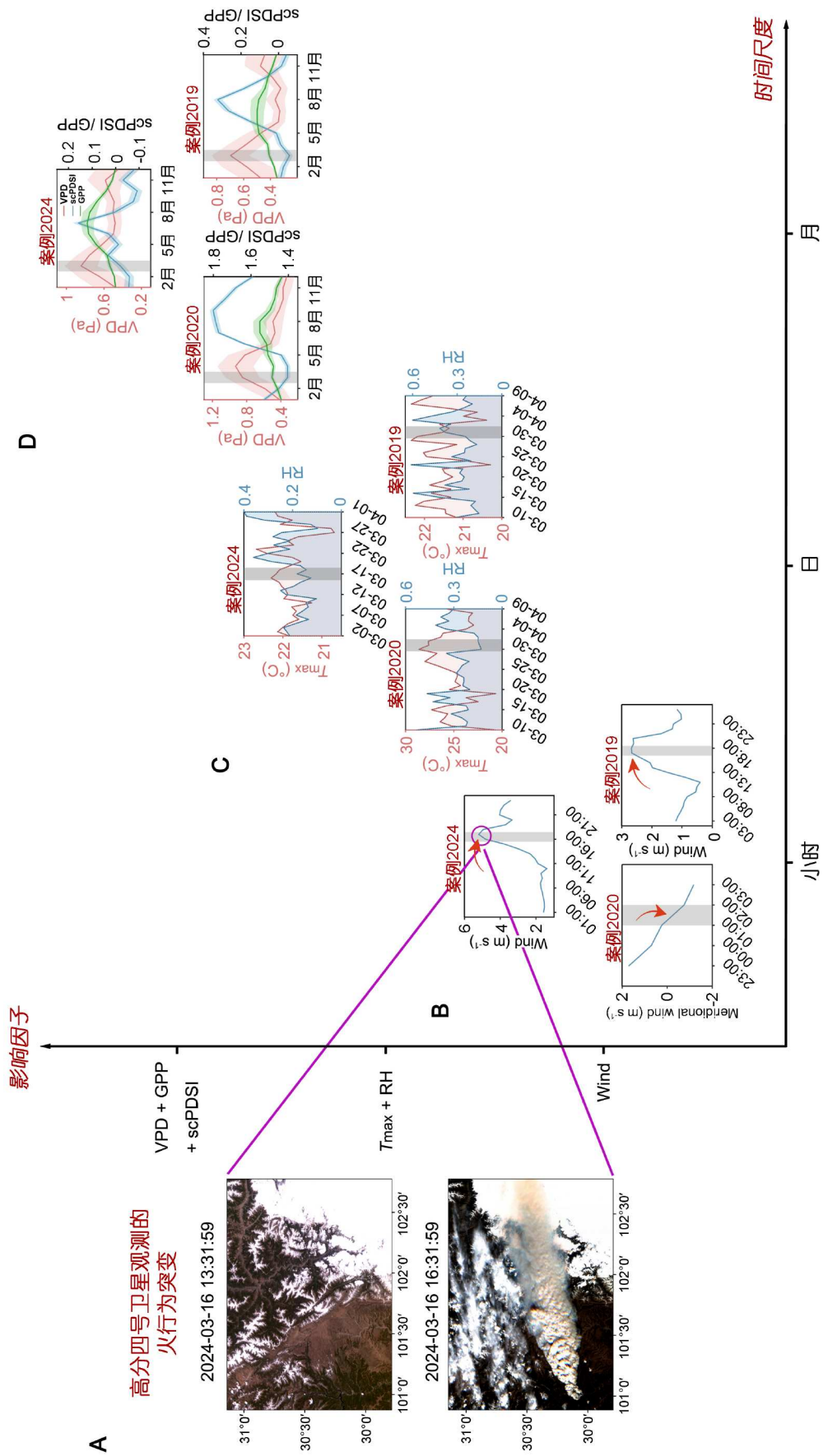


图2 青藏高原东缘三起重特大森林火灾成因分析。(A) 2024年3月16日高分四号卫星观测到的火行为变化。(B) 三起火灾案例中火行为突变的火行为变化。(C) 火行为突变的日尺度成因分析：2019年和2020年案例展示了3月10日至4月9日期间 $T_{\max}$ 与RH的日变化，2024年案例展示了3月2日至4月1日期间 $T_{\max}$ 与RH的日变化。(D) 火行为突变的月尺度成因分析：每个值代表1953–2023年长期平均值，阴影表示标准差。为减小两变量量级差异，2020年案例的GPP值增加了1.4

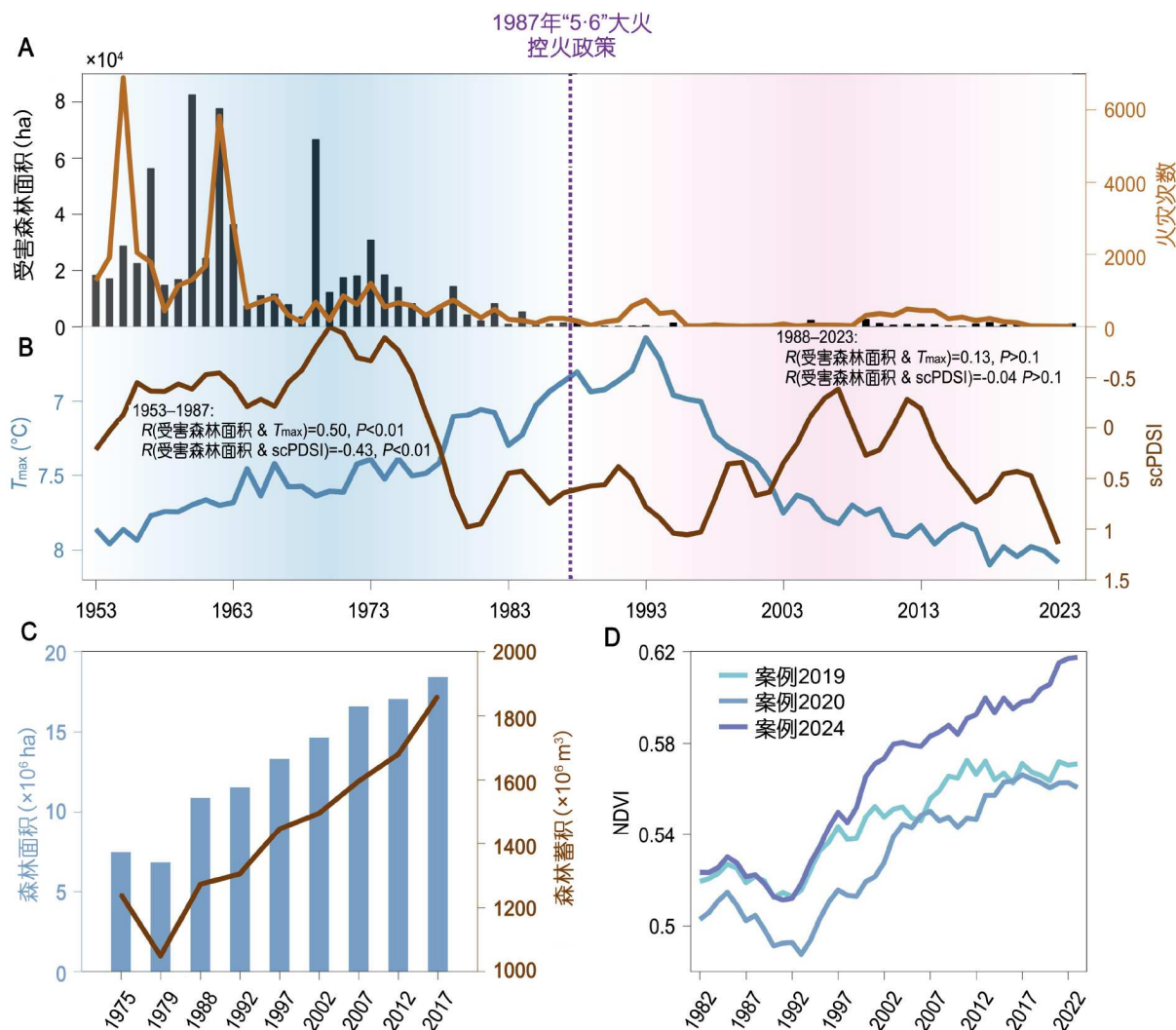


图3 四川省森林火灾、气候和植被状况的时间序列。(A) 1953至2024年四川省森林火灾次数及受害森林面积的年际变化；(B) 1953至2023年四川省 T_{max} 和scPDSI的年际变化，数据为十年滑动平均的结果；(C) 基于国家森林资源连续清查数据的四川省森林面积和森林蓄积时间序列；(D) 基于MODIS卫星数据的三起火灾案例发生地点的NDVI时间序列

时期内能够有效抑制火灾活动。

然而，近年来灾难性火灾的频繁发生表明，这种长期的“抑火效应”已出现反转，其根本原因在于林下可燃物的持续累积。国家森林资源连续清查数据显示，自1987年以来，四川省森林面积与森林蓄积增加近两倍(图3C和3D)；NDVI时序变化也表明典型火灾区的植被生物量持续增长(图3D)。这一趋势主要得益于植树造林、退耕还林等生态工程的长期实施(Wang等, 2021)。与此同时，政府采取的积极灭火策略虽在短期内有效控制了火源，但也在客观上抑制了森林自然火的清除作用，导致林下可燃物不断积累，由此，区域火灾风险逐渐由“气象驱动型”向“可燃物驱动型”转变，这成为近年来极端火行为频发的关键成因。

4 讨论

4.1 多时间尺度分析的不确定性

在案例研究中，针对三起火灾案例起火点的气象条件进行了分析。尽管所采用的气象数据空间分辨率一致，但由于提取气象变量时所选取的起火点缓冲半径存在差异，结果可能存在一定的不确定性。本研究采用空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的气象数据，提取起火点所在像元的数值作为代表。需要指出的是，单个像元的覆盖范围远大于单次森林火灾的实际影响区域，尽管其能够较好地表征大尺度气象背景，却难以精确反映火灾发生位置的局地气象特征。为减轻这一局限性，本研究假设研究区内局地气候条件相对均一，从而在一定程度上降低了因

空间分辨率差异引起的不确定性。

同时,研究所采用的气象数据属于再分析数据,该类数据基于数值模式模拟生成(Hersbach等, 2020),并非实时观测数据。由于模式模拟过程中未考虑实际火灾发生的影响,其结果可能难以准确捕捉火行为动态变化中的细微特征,因此在三起火灾案例分析中,所采用的气象数据具有一定的不确定性。

此外,研究使用GPP数据以反映可燃物载量的月变化。然而,GPP主要表征植被冠层的初级生产力(Bi等, 2022),而森林火灾的发生多受地表可燃物影响,因此以GPP作为可燃物载量的表征指标可能引入一定偏差。然而,考虑到GPP与地表可燃物在长时间尺度上变化趋势基本一致,本研究认为该偏差在整体分析中可予忽略。

4.2 跨尺度气象因子的复合作用

月尺度、日尺度和小时尺度的气象变量之间存在显著的相互作用,且短时间尺度的气象因子往往受到更长时间尺度大气背景条件的调控。例如,较高的VPD通常伴随RH的下降(Balch等, 2022),在VPD偏高的月份,极端高温事件发生的概率也相应上升。在地形陡峭的山区,极端高温进一步影响山谷风的形成与日变化,加剧小时尺度上的山谷风波动(Whiteman, 2000),并通过增强局地大气湍流过程,为重特大森林火灾的发生创造有利条件。

总体而言,多时间尺度的分析结果揭示了气象因子在促进重特大森林火灾发生与发展过程中的复杂作用。小时尺度上的气象要素变化往往是引发火行为突变的直接触发因素,而不同时间尺度气象条件的复合效应,则构成了极端火行为形成的累积性驱动背景。对气象因素跨时间尺度影响机制的深入理解,可为提升森林火灾的预测与预警能力提供关键科学依据,并对制定精准的火灾防控策略具有重要指导意义,尤其适用于地形复杂、火灾高发区域的风险管理实践。

4.3 未来控火政策展望

传统上认为,森林火灾主要受气候因子驱动。然而,如第3.3节所示,火灾防控政策的实施已显著改变了这一关联。本研究揭示了青藏高原东缘火灾管理中的一个关键政策困境:尽管防控政策在短期内有效降低了火灾风险,但其是否可能通过引发其他生态效应而在更长时间尺度上加剧火灾强度?

自1987年以来,中国实施了一系列积极的火灾和森林管理措施,包括积极灭火、植树造林和森林保护等。国家层面出台的《国家森林草原火灾应急预案》《关于

全面加强新形势下森林草原防灭火工作的意见》等重要文件,为现代化火灾管理体系构建了制度基础。近年来,国家通过数万亿元国债资金支持防火基础设施建设,进一步增强了防灾减灾能力。这些协同政策取得了显著的生态成效,其中森林覆盖率的大幅提升(国家林业和草原局, 2019)尤为突出,有效推动了“绿水青山就是金山银山”生态文明理念的实现。

现有研究表明,传统灭火策略,即优先扑灭低中强度的火灾,显著增加了林下可燃物载量,进而提高后续火灾的规模与强度(Kreider等, 2024)。此类管理措施导致了所谓的“灭火偏差”现象,其表现特征与美国西部森林生态系统中记录的模式高度相似(Owens, 2024)。该效应的影响程度相当于一个多世纪以来的可燃物积累或气候变化所产生的作用(Kreider等, 2024)。

近几十年来火灾强度的增加趋势表明,尽管火灾防控政策在短期内有效降低了火灾频次和强度,但长期而言却可能为灾难性火灾创造有利条件。当前环境呈现出可燃物过载、极端高温频发、湿度降低、干旱持续以及大风增多等特征,叠加区域峡谷纵横、地形复杂的特点,不仅显著提高了重特大森林火灾的发生概率,也延长了高火险期的持续时间,扩大了火险空间范围,使以往较少发生森林火灾的地区也面临威胁(Jolly等, 2015; Zhao等, 2020; Abatzoglou等, 2025)。例如,北美和澳大利亚东南部地区的火灾季节起始提前、结束延后,并伴随更频繁的极端火险天气事件(Nolan等, 2020; Duane等, 2021)。尽管历经数十年积极灭火,该趋势仍未扭转。因此,青藏高原东缘“魔鬼火灾季”的出现为理解重特大森林火灾的高风险环境提供了关键窗口。深入揭示其动态机制,对预测未来火灾格局、制定适应威胁升级的防控策略具有重要意义。

在气候变化影响日益加剧的背景下,青藏高原东缘的火灾管理亟需采取更加主动的调控措施,如计划烧除和机械疏伐等,以降低可燃物载量(Li, 2025)。低中强度的火灾有助于避免可燃物过度积累,并通过促进耐火植物物种的恢复,为生态系统创造良性演替条件。该策略标志着火灾管理从“积极扑救”的传统模式,向以提升生态系统韧性为核心的综合治理框架的根本性转变。尽管此类主动管理措施与国际先进实践相契合,其具体实施仍需结合地域特点进行调整。在国家尺度上,由于各地火灾环境差异显著,火灾管理政策的实施效果也存在空间差异,因此有必要因地制宜、分区施策。此外,随着气候变化下火灾风险的不断演变,防控政策也需保持动态适应性,应基于孕灾环境的变化进行灵活调整,同时确保与中国国情和管理体系相适应。

本研究强调,有必要制定更具适应性的火灾管理政策,统筹考虑积极灭火的短期收益与长期风险。尽管传统火灾管理政策在森林资源保护与火灾预防方面发挥了重要作用,但越来越多证据表明,为应对日益严峻的火灾挑战,现行政策亟需转型。推动火灾管理向更具可持续性的理念转变,对在地形复杂、气候多变、人类活动密集区域如青藏高原东缘实现生态与居民安全协同保障具有关键意义。通过系统总结历史经验并与最新科学认知相结合,可望形成更为有效的火灾风险减缓策略,进而提升消防人员安全保障水平。

致谢 高分四号卫星影像的获取来源为<https://data.cresda.cn/#/2dMap>。哨兵二号卫星影像的获取来源为<https://browser.dataspace.copernicus.eu>。CRU TS 4.08版本数据的获取来源为https://data.ceda.ac.uk/badc/cru/data/cru_ts/cru_ts_4.08/data。ECMWF/ERA5数据的获取来源为<https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=download>。DEM数据的获取来源为<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/data/index.htm>。月尺度的GPP和NDVI数据的获取来源分别为<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/1/MOD17A2H-61>和<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/1/MOD13A3-61>。感谢应急管理部以及地方各级消防机构在火灾数据和图像资料获取中提供的支持和帮助。

补充材料 补充材料为作者提供的原始数据,作者对其学术质量和内容负责,详见网络版(<http://earthcn.scichina.com>)。

参考文献

- 曾鹏,程雪力. 2024. 驰援雅江的十二昼夜——四川省森林消防总队扑救四川雅江森林火灾纪实. *中国安全生产*, 4: 9–11
- 国家林业和草原局. 2019. 中国森林资源报告(2014–2018). 北京: 中国林业出版社
- 卢逸致. 2023. 危机管理视角下消防队伍应对重大灾害事故舆情策略研究——以扑救3·30四川凉山森林火灾为例. 硕士学位论文. 福州: 福建师范大学
- 张展. 2020. 习近平对四川西昌市经久乡森林火灾作出重要指示. *现代职业安全*, 5: 8
- Abatzoglou J T, Williams A P. 2016. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proc Natl Acad Sci USA*, 113: 11770–11775
- Abatzoglou J T, Kolden C A, Cullen A C, et al. 2025. Climate change has increased the odds of extreme regional forest fire years globally. *Nat Commun*, 16: 6390
- Alexandro B L, Simon T, David B L, et al. 2020. Wildfire debate needs science, not politics. *Science*, 370: 416–417
- Balch J K, Abatzoglou J T, Joseph M B, et al. 2022. Warming weakens the night-time barrier to global fire. *Nature*, 602: 442–448
- Bi W J, He W, Zhou Y L, et al. 2022. A global 0.05° dataset for gross primary production of sunlit and shaded vegetation canopies from 1992 to 2020. *Sci Data*, 9: 213
- Bowman D M J S, Williamson G J, Abatzoglou J T, et al. 2017. Human exposure and sensitivity to globally extreme wildfire events. *Nat Ecol Evol*, 1: 0058
- Chen F, Du Y S, Niu S K, et al. 2015. Modeling forest lightning fire occurrence in the Daxinganling Mountains of Northeastern China with MAXENT. *Forests*, 6: 1422–1438
- Chen X F, Li Z Q, Zhao S S, et al. 2018. Using the Gaofen-4 geostationary satellite to retrieve aerosols with high spatiotemporal resolution. *J Appl Rem Sens*, 12: 1
- Das A, Agrawal R, Mohan S. 2014. Topographic correction of ALOS-PALSAR images using InSAR-derived DEM. *Geocarto Int*, 30: 1–9
- Duane A, Castellnou M, Brotons L. 2021. Towards a comprehensive look at global drivers of novel extreme wildfire events. *Clim Change*, 165: 43
- Field R D, van der Werf G R, Shen S S P. 2009. Human amplification of drought-induced biomass burning in Indonesia since 1960. *Nat Geosci*, 2: 185–188
- Godfree R C, Knerr N, Encinas-Viso F, et al. 2021. Implications of the 2019–2020 megafires for the biogeography and conservation of Australian vegetation. *Nat Commun*, 12: 1023
- Goss M, Swain D L, Abatzoglou J T, et al. 2020. Climate change is increasing the likelihood of extreme autumn wildfire conditions across California. *Environ Res Lett*, 15: 094016
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc*, 146: 1999–2049
- Huang F M, Yang J B, Zhang B, et al. 2020. Regional terrain complexity assessment based on principal component analysis and geographic information system: A case of Jiangxi Province, China. *Isprs Int J Geo-Inf*, 9: 539
- Huete A R, Didan K, Huete A, et al. 1999. MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document Principal Investigators Development
- Jolly W M, Cochran M A, Freeborn P H, et al. 2015. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nat Commun*, 6: 7537
- Kreider M R, Higuera P E, Parks S A, et al. 2024. Fire suppression makes wildfires more severe and accentuates impacts of climate change and fuel accumulation. *Nat Commun*, 15: 2412
- Li J. 2025. Modernizing wildfire management in China. *Science*, 388: 159
- Marlon J R, Bartlein P J, Gavin D G, et al. 2012. Long-term perspective on wildfires in the western USA. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109: E535–43
- Nolan R H, Boer M M, Collins L, et al. 2020. Causes and consequences of eastern Australia's 2019–20 season of mega-fires. *Glob Change Biol*, 26: 1039–1041
- Orison O W. 2025. Los Angeles County in flames: Responsibilities on fire. *Lancet Planet Health*, 42
- Osborn T J, Jones P D, Lister D H, et al. 2021. Land surface air temperature variations across the globe updated to 2019: The CRUTEM5 data set. *J Geophys Res-Atmos*, 126: e2019JD032352
- Owens B. 'Fire clouds' from super-hot wildfires are on the rise as Earth warms. *Nature*, 2024, doi: 10.1038/d41586-024-02530-2
- Page W G, Butler B W. 2018. Fuel and topographic influences on wildland firefighter burnover fatalities in Southern California. *Int J Wildland Fire*, 27: 141–154
- Peterson D A, Hyer E J, Campbell J R, et al. 2015. The 2013 Rim Fire: Implications for predicting extreme fire spread, pyroconvection, smoke emissions. *Bull Amer Meteorol Soc*, 96: 229–247
- Ruffault J, Mouillot F. 2017. Contribution of human and biophysical factors to the spatial distribution of forest fire ignitions and large wildfires in a French Mediterranean region. *Int J Wildland Fire*, 26: 498–508
- Shen C F, Li G P, Dong Y C. 2022. Vertical structures associated with orographic precipitation during warm season in the Sichuan basin and its

- surrounding areas at different altitudes from 8-Year GPM DPR observations. *Remote Sens*, 14: 4222
- Stavrakoudis D, Katagis T, Minakou C, et al. 2020. Automated burned scar mapping using Sentinel-2 imagery. *J Geogr Inf Syst*, 12: 221–240
- Su Z W, Tigabu M, Cao Q Q, et al. 2019. Comparative analysis of spatial variation in forest fire drivers between boreal and subtropical ecosystems in China. *For Ecol Manage*, 454: 117669
- Viegas D X, Simeoni A. 2011. Eruptive behaviour of forest fires. *Fire Technol*, 47: 303–320
- Wang H, He M Y, Ran N, et al. 2021. China's key forestry ecological development programs: Implementation, environmental impact and challenges. *Forests*, 12: 101
- Whiteman C D. 2000. *Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications*. Oxford: Oxford University Press
- Xing Y W, Ree R H. 2017. Uplift-driven diversification in the Hengduan Mountains, a temperate biodiversity hotspot. *Proc Natl Acad Sci USA*, 114: E3444–E3451
- Xiong Q L, Luo X J, Liang P H, et al. 2020. Fire from policy, human interventions, or biophysical factors? Temporal-spatial patterns of forest fire in southwestern China *For Ecol Manage*, 474: 118381
- Yao Q C, Brown P M, Liu S R, et al. 2017. Pacific-Atlantic Ocean influence on wildfires in northeast China (1774 to 2010). *Geophys Res Lett*, 44: 1025–1033
- Yao Q C, Jiang D B, Zheng B, et al. 2024. Anthropogenic warming is a key climate indicator of rising urban fire activity in China. *Natl Sci Rev*, 11: nwae163
- Zhao F J, Liu Y Q. 2019. Atmospheric circulation patterns associated with wildfires in the monsoon regions of China. *Geophys Res Lett*, 46: 4873–4882
- Zhao F J, Liu Y Q. 2021. Important meteorological predictors for long-range wildfires in China. *For Ecol Manage*, 499: 119638
- Zhao F J, Liu Y Q, Shu L F. 2020. Change in the fire season pattern from bimodal to unimodal under climate change: The case of Daxing'anling in Northeast China. *Agric For Meteorol*, 291: 108075

(责任编辑：许晨曦)