

2023年夏威夷毛伊岛火灾事件的初步分析

■ 翟薇 高伟超 李雁 贾朋群

夏威夷毛伊岛火灾发生时，美国国家天气局（NWS）前期预测的火险已经成真并超过了半天时间，但NWS的预警依然用之前的文字描述，难以令当地人更加警觉。同时，此次预警和目前气象探测的技术手段存在差距，特别是没有利用高时间分辨率的气象卫星数据，全面、及时和准确地给出上午火灾发展的范围、火区随风速的推进、明火区和烟尘区的范围，也没有进一步分析可能复燃的火点并进行再预警。实际上这样的技术已经具备甚至还可以做得更好。

中图分类号：P4

文献标志码：A

DOI：10.3969/j.issn.2095-1973.2024.03.001

2023年8月，伴随飓风临近带来的强风天气，先是电线杆被吹倒引发林地火灾，又因可燃物被大风带到居民区，导致美国夏威夷州毛伊岛发生大规模山火，最终造成巨大损失——101人遇难，2200多座建筑被毁，火灾主要发生地拉海纳镇的1.3万居民中有6000多人流离失所，经济损失达55亿美元。

2024年4月，在火灾发生8个多月后，美国夏威夷州总检察长安妮·洛佩兹公开了毛伊岛火灾第一阶段调查报告《拉海纳火灾全面时间表报告》（简称调查报告，图1）。这份旨在发现事实的报告，是本次灾害3份调查报告的第一份，尤其引人关注。预计2024年底前，另外2份关于火灾系统分析和评估建议的报告也将公开。



图1 美国夏威夷毛伊岛火灾第一份调查报告

调查报告由受委托的第三方机构马里兰州哥伦比亚市消防安全研究所（FSRI）完成。如题目所述，这

份376页的报告，聚焦这次灾害中受灾最严重的拉海纳镇（Lahaina，本次灾害在学界一般称为拉海纳火灾），基于大量证据和现代火灾科学，全面描绘灾害过程的时间表，并将各种因素汇聚其中，从而为全面评估打下基础。面对巨灾的发生，厘清事实是查清起因和评估应对过程得失的第一步，而用时间表的形式进行梳理，涵盖火灾发生前、发生期间和发生之后的整个过程，是解开人和自然在其中复杂和交错关系基础的有效方式。这份报告的发表，距离揭示很多自然和人为真相无疑更近了一步。本文基于调查报告和其他文献，试图串联起报告中关于天气及相关灾害预防、应对和影响等线索，从气象服务角度对报告主要内容进行解读，揭示需要汲取的教训。

1 2023年8月毛伊岛火灾概况

2023年8月8—9日，位于美国夏威夷州的毛伊岛发生了多次火灾，4个火点中位于岛屿西端拉海纳镇的火灾最为严重。FSRI将其定义为由环境和地理因素共同作用，加上防备和反应条件限制，导致迅速从草原大火转变为灾难性城市大火，造成毁灭性后果的火灾（图2）。拉海纳火灾最初是因8日早上伴随飓风靠近带来的强风吹倒居住区外的输电线杆导致起火，随后燃烧的落叶等借风势传到镇居民区引发居民区大火，中午前后，火被扑灭。下午居民区火场复燃，再次借助大风扩散，最终带来灾难性后果。

气象部门最早发出警告。8月8日火灾发生前，因飓风“朵拉”（Dora）从海岛南部靠近并在距离海岸约500 miles（1 mile \approx 1.6 km）处通过，形成一个压力梯度。气象部门据此预测毛伊岛将会出现具有破坏力

资助信息：中国气象局气象软科学项目（2024ZDIANXM15）；国家自然科学基金项目（42142009）

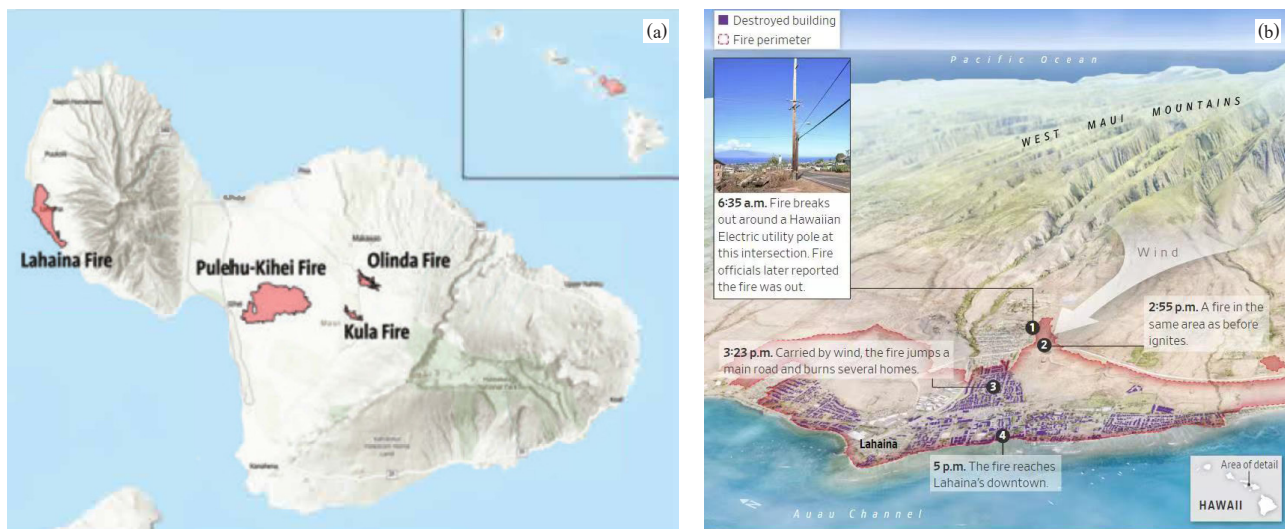


图2 位于夏威夷的毛伊岛及2023年8月8—9日的4起火灾 (a, 来源: Kerber等, 2024) 和毛伊岛火灾的主要进程 (b, 来源: 2024年4月18日华尔街日报)

的强风和低湿度天气，同时发布了野火风险最高等级预警——红旗预警。美国国家天气局 (NWS) 以及毛伊岛县 (MEMA) 和夏威夷州应急局 (HI-EMA) 多次发布8月8日可能出现大风和极端火灾危险的警报，MEMA还在8月7日晚部分启动了紧急行动中心 (Emergency Operations Center, EOC)。

上午火情带来隐患。8月8日清晨，毛伊岛中西部出现预期的大风，刮倒了树木和电线杆，堵塞了关键道路，为后来的疏散带来隐患。在干燥和持续大风中，06:35 (地方时，下同) 灌木丛火灾发生并快速移动。强风、多岩石的地形、峡谷和火区上方电线杆使灭火复杂化。大火迅速蔓延，直到消防队员赶到，使用私人推土机和水罐车，才扑灭大火。消防队员于14:17撤出。

下午火情变本加厉。消防员撤出不久，14:55在相同地点火灾再次发生，因为持续大风将余烬带到最初火灾地点下风处的草原区，火灾范围扩大并到达房屋和其他建筑物。

大风把大火吹进拉海纳镇，并向太平洋方向蔓延，造成了一场大规模火灾，淹没了该镇有限的疏散路线，其中一些路线还被倒下的电线杆和电线挡住了。

大风的双重作用让救援难以实施。最早被大风吹倒的树木和电线杆已经阻塞了主要道路，而着火后，风吹浓烟导致能见度低，使警察和消防员试图疏散火区居民的努力难以实现。许多居民发现自己被困，无法逃离不断蔓延的火焰和令人窒息的浓烟。

野火变成城市大火导致损失激增。消防员因各种原因既无法控制火情，也难以有效疏散居民，一场野

火终于演变成为城市灾难 (图3)。



图3 毛伊岛火灾现场 (来源: Kerber et al., 2024)

2 毛伊岛火灾发展的气象相关要素

FSRI的报告按照事件、火灾前和火灾及应对 (划分为火势发展、消防、警察局、电力公司、供水部门、应急部门、关键通信、医疗救护、海岸卫队、飞机救援和森林部门等的应对) 展开详细调查，并给出按照时间线的火情和应对活动。基于报告并参考其他文献，可以梳理出本次火灾关键进程和气象野火服务信息 (表1)，有利于认识和分析灾害发生和应对过程。

早在8月1日 (火灾前一周的周二)，NWS国家飓风中心预计飓风“朵拉”将在当周晚些时候在太平洋中部穿越 140°W ，该天气形势将导致下个周一、周二 (8月7—8日) 信风加强，加上干旱指数 (Keetch-Byram Drought Index, KBDI) 在该年夏季首次超过600，可

表1 毛伊岛火灾火情发展及相关气象环境

序号	时间	野火气象服务相关信息	结果和描述	其他
1	火灾前到7月31日	强风和低湿度天气形成		
2	8月1日	NWS预测飓风“朵拉”经过后夏威夷地区风速增大，空气干燥	下周可能出现红旗火灾	
3	8月3日	NWS讨论地面和高空风	下周初可能出现严重火灾天气	
4	8月5日	NWS调整火情天气级别	下周一、二将出现严重火险天气，周二将特别干燥	
5	8月6日	NWS发布预报意见	7日开始出现严重火情天气，特别提及拉海纳镇等背风地区	MEMA在社交媒体发布大风监测通报
6	8月7日	03:15, NWS发布大风和火灾红旗预警，预测出现灾难性强风；03:30, 火灾天气预报；04:42, 再次强调红旗预警；15:40, 强风展望，预测直到8日夜持续强风和阵风	周二晚间将出现强风和阵风	MEMA通过社交媒体宣布夏威夷岛所有背风地区红旗火灾预警，直到9日06:00；县消防局发布大风、大浪和红旗火灾警报
7	8月8日	NWS重申强风和红旗预警，预测瞬时风速达到60 mph	对比站09:35和16:35阵风分别达74 mph和82 mph	
8	8月8日03:17	红旗火灾预警	强调强风（东风30~45 mph，阵风60 mph）和低湿（35%~45%）	红旗预警直到9日06:00
9	8月8日04:00	火灾天气预测	KBDI约600	预警地点特别提及毛伊岛西部背风区和拉海纳镇
10	8月8日06:34	拉海纳上午火灾开始	为快速蔓延的丛林火灾	火灾数小时后得到控制
11	8月8日09:26	NWS在社交媒体上更新强风和火险天气预警	学校关闭（06:40）；避难所开启（06:40）；道路封闭，停电等（08:19）；撤离（08:10）	
12	8月8日14:55	拉海纳下午火灾开始	911报警电话；MFD出动	上午火灾区内复燃
13	8月8日15:39	强风预报和火灾红旗预警	周三下午将出现强风和阵风	
14	8月8日15:41	红旗预警有效，直到9日18:00		

注：3个时间参考点：火灾前（8日06:34前），拉海纳上午火灾（8日06:34—14:17），拉海纳下午火灾（8日14:55—9日06:00），8月7日为周一；MFD为当地消防；1 mph≈1.6 km/h。

能满足火灾红旗预警条件。该火灾预警信息伴随飓风“朵拉”的移动和靠近被不断强化，直到火灾当天，全面的量化指标和不断被强调的红旗火灾天气警报达到顶点。

造成巨大损失的拉海纳下午火灾，第一个着火点可能是一个仓库，该处火点余烬被风向西吹送，20 min左右到达一座公园后，火情开始在毛伊岛西海岸向南北两个方向蔓延，在经过居民区时带来了毁灭性的灾害。

3 美国气象部门针对毛伊岛火灾的服务

3.1 2023年毛伊岛火灾服务

FSRI的调查报告，主要从消防视角梳理灾情演化细节，并没有在正文里专门给出联邦气象部门在本次事件中的应对时间表，也没有将气象条件和气象野火预测预警等列为最重要的内容。但是，报告全篇不断强调气象部门发布的强风预警和火警预警等信息。调查报告中介绍了NWS夏威夷地方气象机构的设置情况；在报告的两个附件中分别给出了NWS的产品发送情况和与拉海纳镇气候相似性最好的夏威夷岛气象站同期风记录的细节。

NWS在夏威夷设立的地方气象预报台（HWO），位于夏威夷大学校园内，而夏威夷大学校区位于夏威夷主岛。调查报告遗憾地提及，在毛伊岛火灾前，当

地尚没有开展风观测的气象站点。

NWS提供的服务中，包括了发布火险天气展望和红旗警报等两个主要产品，其中，红旗警报是火险天气最高等级的预警。针对远离美国本土的夏威夷岛，涉及火险天气服务的事项也更加丰富，相关的内容包括：1) 火灾天气规划预报；2) 火灾天气参数（相对湿度、风、混合高度）预报图；3) 夏威夷地区NWS点预报（基于在线申请）；4) 夏威夷远程自动气象站（RAWS）数据；5) 火灾天气业务计划更新；6) 夏威夷州火灾天气计划；7) 全国火灾天气计划。

此外，报告中多次提及的导致红旗预警的KBDI指数，虽然名称里包括了干旱，但在应用层面更多地应用于确定森林火灾的可能性。KBDI的依据是每天水平衡，该指数表示土壤恢复到完全水饱和（假定最大储存能力为8 in（1 in≈2.54 cm）降水）所需的降水量（以0.01 in为单位）。该指数范围在0~800，其中0代表无需降水补充，800代表绝对干旱条件。从NWS为本次火灾提供服务产品的说明中不难发现，在飓风带来强风和干燥的天气背景下，红旗火险预警的支撑条件就是KBDI达到或超过600。

野火预警最高等级的红旗预警，需要同时满足干旱指数、风速和湿度3个指标（表2）。

至少从本次调查报告看，报告对气象部门在火情发展时间表中的作用描述均以正面为主，特别是在灾

表2 美国气象部门夏威夷地区野火红旗预警指标和阈值

变量	指标	阈值	说明
干旱指数	KBDI指数	大于600	NWS基于夏威夷主岛机场气象站数据计算得到
风速	风速	大于8.9 m/s	取自毛伊岛机场气象站
湿度	相对湿度	小于45%	
红旗预警	所有指标超越阈值且至少维持2 h		

情前一周即给出火险天气展望，临近时又发布和维持火险最高等级“红旗预警”，同时在社交媒体等信息出口，频繁强调维持天气展望相关内容和火险最高等级预警还在持续中。

3.2 针对2018年类似灾情的研究分析

本次毛伊岛重大火灾事件与2018年8月飓风“莱恩”（Lane）导致的夏威夷暴雨和火灾事件有很多相似性，例如，都是飓风引发，造成严重灾害的居民区火灾均来自周围荒地，都与前期雨季荒地生物量积累并在干早期迅速干燥的隐患有关等。二者的区别仅仅在于2018年灾害以暴雨为主，但同期发生的3处火灾，有2处位于2023年火灾发生地的毛伊岛西部（图4）。

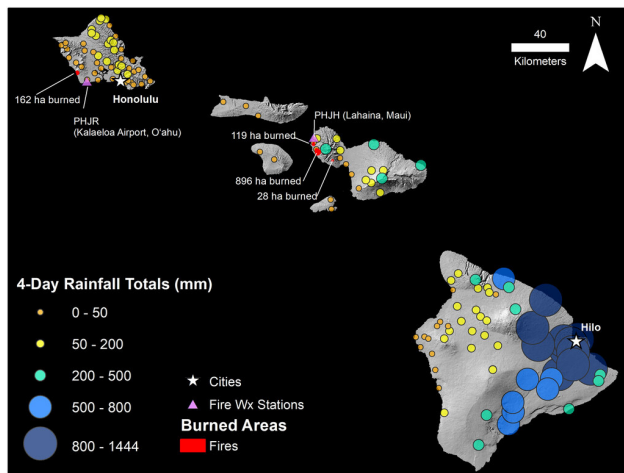


图4 2018年8月夏威夷受飓风Lane影响发生的暴雨和野火灾害分布（图中给出8月22—25日降水分布和火灾范围，来源：Nugent et al., 2020）

2018年飓风影响导致的暴雨和野火灾害过后，夏威夷气象部门联合当地高校，针对本次灾情进行了较为细致的分析，得到的一些结论具有一定的启发意义。例如，当地气象部门早就注意到飓风在夏威夷看似矛盾、并非具有广泛代表性的双重致灾作用：引发一些迎风坡地区出现暴雨而背风坡地区发生野火。

1) 飓风对于位于太平洋上、地形多变复杂的夏威夷诸岛，容易形成复合灾害，例如暴雨和火灾同时或先后发生这类不太常见的案例。灾害形成的主要原因在于飓风周边大范围下沉气流，以及与地形相关的下坡风，形成有利于火灾发生的干燥和大风天气条件。

2) 针对夏威夷诸岛，由于分布着广泛的荒地，强风能导致树木倒伏，使得可燃烧物在地面堆积，这是该岛区域历史上多野火发生的重要因素之一。尤其是，由于历史原因，夏威夷全州在过去60年里，农业生产区（耕地和牧场）面积减少了60%，而被遗弃的耕地和牧场成为新的荒地，覆盖着非源自本地且易燃的草和灌木。这类地区占到全岛面积的近25%，而农业生产持续下降空出的土地，部分用于住宅开发，导致土地利用的改变和居民区与荒地交叉分布的复杂情况，不仅易于发生火灾，而且一旦发生，影响将被放大。

4 小结和讨论

在野火呈现快速增加趋势的背景下（图5），2023年8月8—9日，2 d之内美国夏威夷州毛伊岛发生4起火灾，其中发生在拉海纳镇的火灾最为严重，也是调查机构第一份报告的主要研究对象，另外3起火灾及其对拉海纳火灾的影响，将包括在后续报告中。

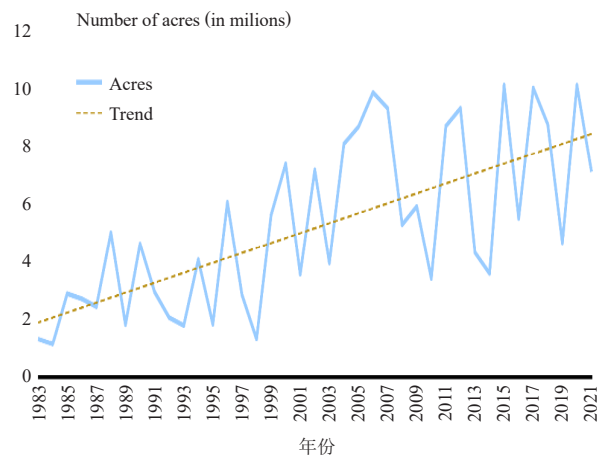


图5 1983—2021年美国野火过火面积变化（来源：GAO, 2023）

本文分析的火灾调查报告的主体，基于图片、视频、无线电通信记录、自动车辆定位信息、短信、社交媒体、电子邮件和被确信的亲身经历等，以时间表的方式对事件的进程进行梳理，主要目的是阐述基本事实而非厘清责任或评估处置合理性等，虽然后者是调查的最终目的之一，但基本事实的确定，无疑是客观评估本次灾害事件的基础，是找到依据的重中之重。

4.1 高风险区域缺少气象设施导致灾情气象记录不完整，详细预警信息无法有效验证

位于背风坡的拉海纳镇以及整个毛伊岛西部没有配备自动气象站，其后果之一是一旦出现灾情，无法获得完整的气象记录。尤其是在该岛西部历史上

记载了大量的火灾情况下(图6), 区域范围内没有气象设施更是难以理解。这次灾害前后, 气象部门多次发布拉海纳地区强风预警, 由于没有气象观测而难以进行检验。本次火灾过程, 对当地风场实况最好的提

示, 并非来自距离拉海纳镇最近、位于背风坡的气象站, 而是来自位于夏威夷主岛背风坡的气象站: 8日 11:35—16:35平均风速为40 mph, 平均阵风风速为70 mph, 最高风速为82 mph。

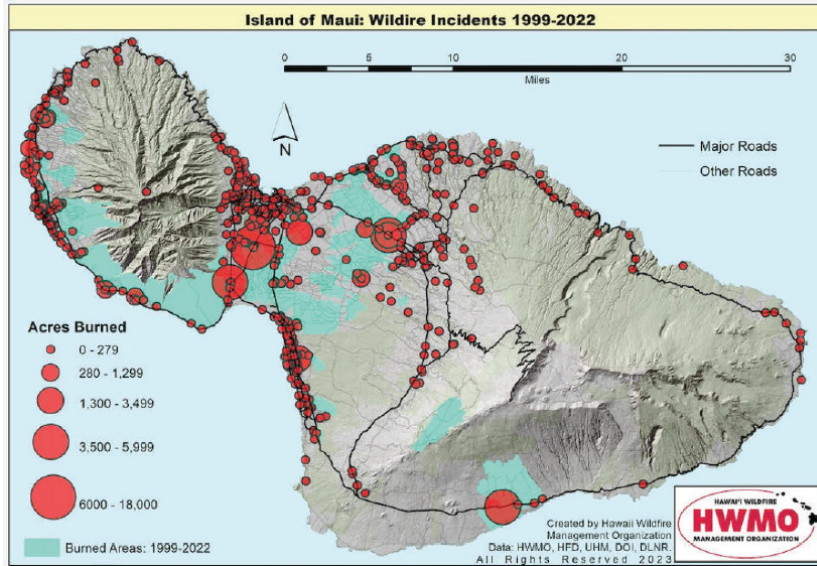


图6 1999—2022年毛伊岛野火事件 (来源: Kerber et al., 2024)

历史上, 包括毛伊岛在内的整个夏威夷岛曾经遍布雨量站(图7), 这或许与岛上很多种植园与降水关系密切有关。夏威夷最早的雨量站1837年建立, 最盛期的1968年有超过950个站同时观测。到了20世纪70—80年代, 雨量站锐减, 但在2012年依然有404个站。图8给出毛伊岛火灾期间的2023年8月毛伊岛雨量站分布, 大约17个站有观测数据。

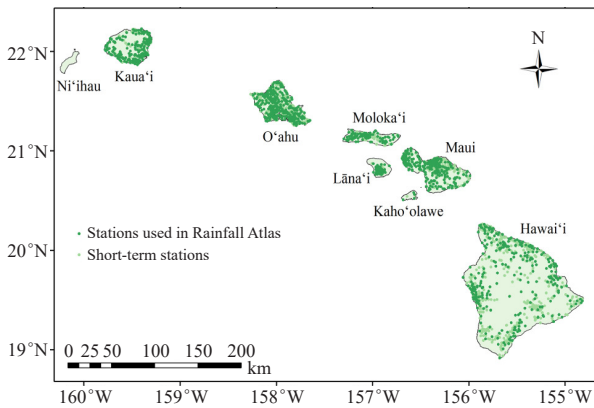


图7 过去150年夏威夷雨量站分布 (来源: Frazier et al., 2016)

4.2 毛伊岛当地土著文化中, 强调对灾害性强风的Kaua'ula风的防备不该忽视

本次火灾看似是一次飓风带来的强风导致, 实际上是当地多发灾害。与中国焚风对应, 当地土著用Kaua'ula风(指从山上刮来的强风, 是由信风引起的,

常给拉海纳造成破坏性后果)表达这种强风的危害。带来本次火灾主要灾情的下午火灾, 其性质是上午火灾发生范围中位于居民区(仓库)的复燃。上午火灾的原因之一是当地荒地电线杆被强风吹倒, 火势后来蔓延到居民区。下午复燃的一个主要转折点, 就是将最初燃烧点从荒地-城市结合部转到居民区, 即荒地野火转变为社区大火。尤其是, 上午火灾被控制后, 红旗火险天气并没有解除, 消防对上午火灾余烬可能再燃的忽视, 无疑埋下了巨大隐患。另外, 如果充分重视土著文化中对引发野火的强风防备意识, 毛伊岛居民区与荒地之间完全可以预留防火通道(需要具有防止燃烧落叶被风传播的功能), 可以有效避免自然野火快速蔓延到邻近的居民区。

4.3 荒地-城市界面火灾应该引起更多重视

国际消防界认为, 建筑环境中大型户外火灾近年来显著增多, 已经成为威胁数十亿人口的全球性风险, 其中荒地-城市界面(Wildland-Urban Interface, WUI)火灾尤其值得关注。2022年, 美国科学院系统研究了WUI火灾并给出完整定义, 说明其在空气污染和危害更大范围人类健康方面的风险。毛伊岛火灾在很多方面验证了WUI火灾的一些基本特征(图9), 包括最先毛伊岛东部荒地起火点产生大量燃烧和发光物微粒, 随后借助风、地形等火焰物火种迅速传播到居

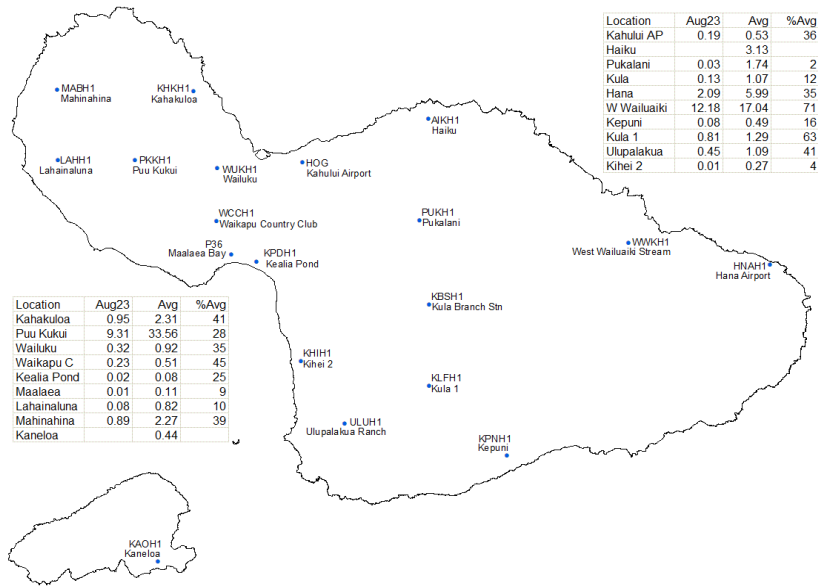


图8 2023年8月毛伊岛降水量观测站及月雨量与平均值 (来源: NWS, https://www.weather.gov/images/hfo/hydrosun/maui_0823.gif, 访问时间: 2024年5月)

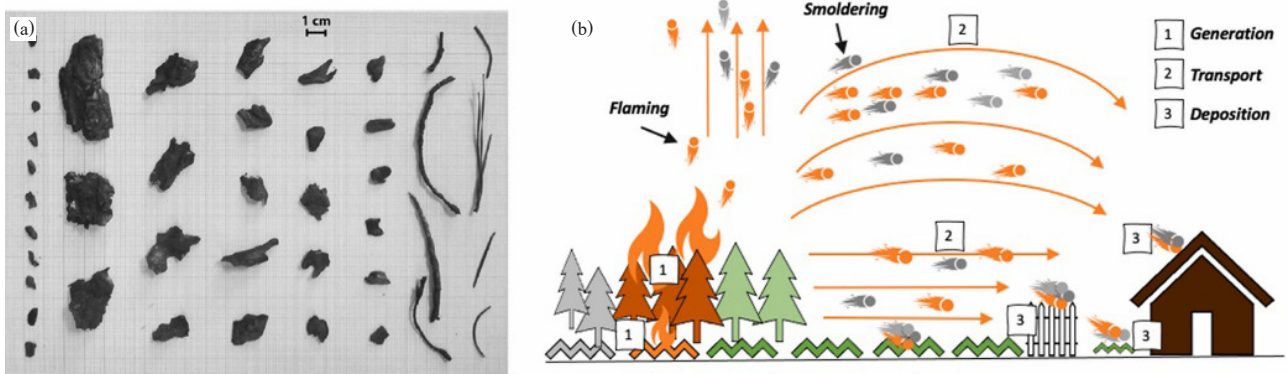


图9 火种 (a) 和燃烧传播的3个过程: 产生、传输和沉降 (b) (来源: Juliano et al., 2024)

民区。考虑到毛伊岛东部地表以树木和其他植物为主, 本次火灾中被传播的火种主要由植被(树皮、树叶和树枝)组成。研究表明, 这种借助天气条件的火种传播, 能够在WUI造成巨大损失, 其中传播的3个主要过程包括: 燃烧物的产生(前期火灾产生不同质量、大小、形状和材料类型的微粒); 燃烧物传输(包括距离和燃烧状态); 燃烧物沉降以及再次点燃其他可燃物的可能(燃烧物的剩余能量/温度及其点燃的可能性)。

在这样的过程中, 始于荒地的野火和造成重点灾难的居民区火灾之间, 最初火源和天气形势的助推是关键。

4.4 虽然报告中描述的NWS和夏威夷州气象部门针对本次火灾的服务非常到位, 但依然存在可改进之处

近年来, 随着美国野火发生态势的恶化, NOAA

在日常工作中, 对日益增多的野火还是十分重视的。考虑到野火灾害预防和救灾全链条涉及多部门、多学科, 2021年NOAA气象项目办公室编辑出版了2003年以来社会科学及火灾气象文献目录, 以野火的准备和缓解、疏散模拟、风险认知、风险沟通和警告、决策支持和事件管理、火灾天气预报和产品服务为主题, 汇编了火险相关研究成果, 目的就是为从火灾全链条提升气象预警的效果。野火是一种生物物理和社会现象, 因此其原因和社会影响无法通过任何单一的学科视角理解。美国气象部门编辑的火灾气象文献目录, 尤其重视社会科学在减轻火灾方面的作用。此外, 美国最重要的科学标注和规范研究机构国际标准化技术局(NIST)的研究表明, 风对于长距离火种传播导致的WUI火灾会带来高风险。

本次火灾中最具杀伤力的火灾是8日下午发生在拉海纳镇的WUI火灾复燃。换句话说, 造成重大损失

的火灾发生时，NWS前期预测的火险发生超过了半天时间，但NWS的预警依然用之前文字描述，显然难以令当地人更加警觉；也没有与目前气象探测的技术手段（图10、图11）相结合，特别是没有利用高时间分辨率的气象卫星数据，全面、及时和准确地给出上午火灾发展的范围、火区随风速的推进、明火区和烟尘区的范围，以及进一步分析可能复燃的着火点并进行再预警。实际上这样的技术已经具备（图12）甚至还可以做得更好。

总之，尽管人们还依稀记得2018年11月发生在美国加州的大火，导致了85人死亡，1.8万栋以上的建筑遭到毁坏，火灾发生地——天堂镇90%以上建筑被毁。然而，类似的WUI火灾不幸5年后在夏威夷再次上演。美国政府承认，超过1亿美国人受到包括WUI火灾在

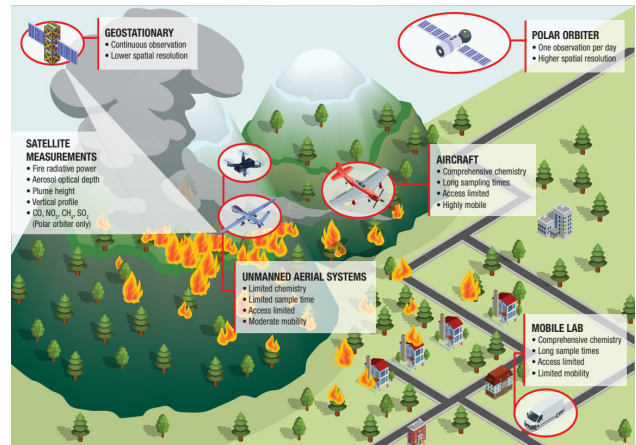


图10 火灾预防和救护关键技术和做法示意图（来源：National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022）

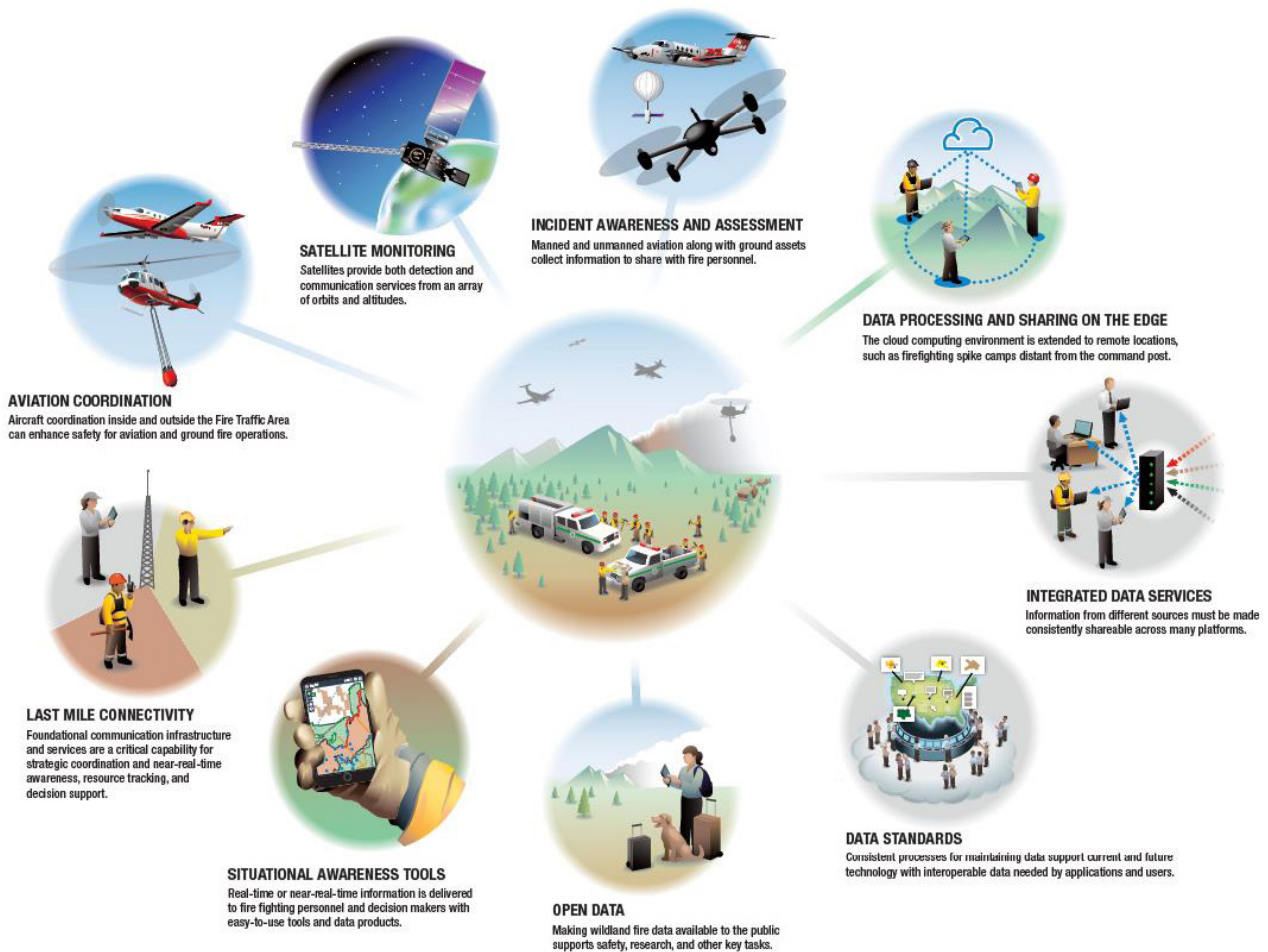


图11 野火应对的关键工具和技术（来源：Executive Office of the President, 2023）

内的野火威胁，尤其是低收入、农民和少数裔群体。毛伊岛火灾似乎在诠释这一事实，而改变这一现象不仅对全球具有意义，也考验着政府、学界和民众融合各种科学认知、采用先进技术手段和加快普及消防安

全文化意识等形成的合力。气象部门既是这种合力的组成部分，也是能通过天气预警最早发出野火防御信号的机构，无疑还需要在完善预报预测能力的同时，在提前应急和启动多部门应急方面，有更多的作为。

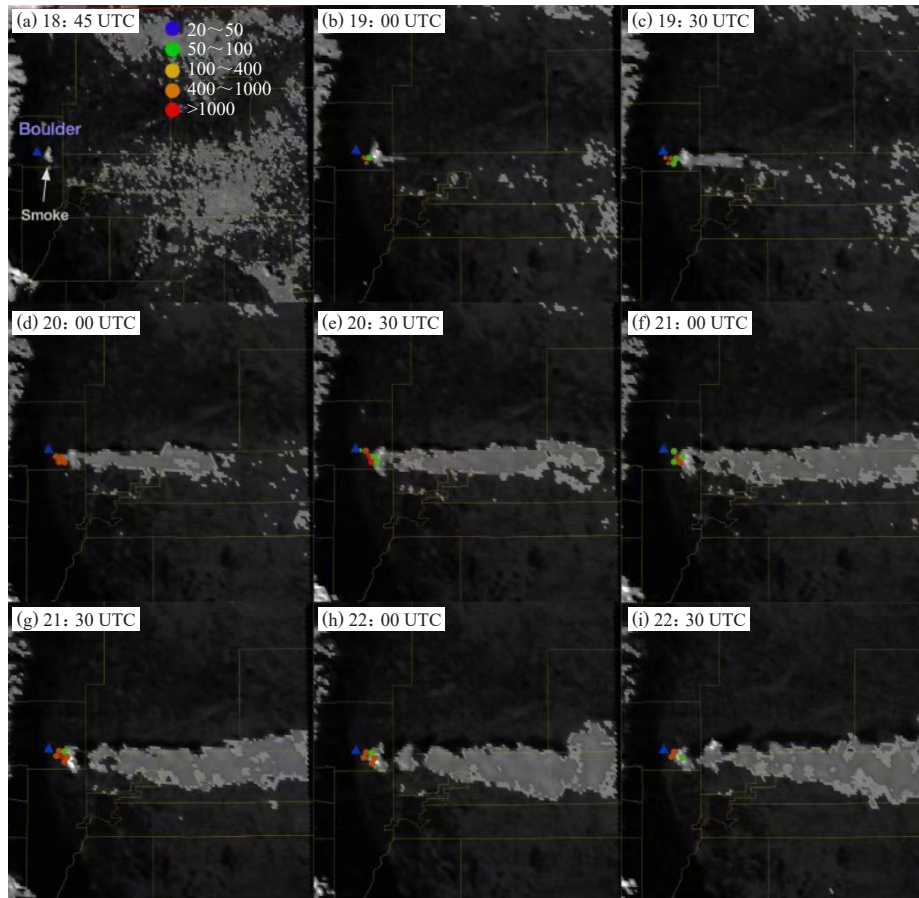


图12 2021年12月30日科罗拉多州大规模火灾过程中, GOES-16可见 ($0.47 \mu\text{m}$) 图像对火点和烟尘演化的监测 (彩色圆圈给出GOES-16反演得到的火辐射力 (Fire Radiative Power, FRP)) (来源: Jones et al., 2024)

深入阅读

Executive Office of the President, President's Council of Advisors on Science and Technology, 2023. Report to the President. Modernizing wildland firefighting to protect our firefighters. https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2023/02/PCAST_Wildfires-Report_Feb2023.pdf.

Filkov A I, Tihay-Felicelli V, Masoudvaziri N, et al, 2023. A review of thermal exposure and fire spread mechanisms in large outdoor fires and the built environment[J]. *Fire Safety Journal*, 140: 103871.

Frazier A G, Giambelluca T W, Diaz H F, et al, 2016. Comparison of geostatistical approaches to spatially interpolate month-year rainfall for the Hawaiian Islands[J]. *International Journal of Climatology*, 36(3): 1459-1470.

GAO, 2023. Wildfire smoke: opportunities to strengthen federal efforts to manage growing risks[R]. USA: U.S. Government Accountability Office.

Jonsson E L, Butler K M, Fernandez M, et al, 2023. Wind-driven fire spread to a structure from firewood piles[R]. Gaithersburg: NIST.

Jones T, Ahmadov R, James E, et al, 2024. Ingesting GOES-16 fire radiative power retrievals into Warn-on-Forecast System for Smoke (WoFS-Smoke)[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 33: WF23133.

Juliano T W, Szasdi-Bardales F, Lareau N P, et al, 2024. Brief communication: The Lahaina Fire disaster—how models can be

used to understand and predict wildfires[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(1): 47-52.

Katie P, 2021. Social science and fire weather 2003–2021 bibliography[R]. Silver Spring: NOAA.

Kerber S, Alkonis D, 2024. Lahaina Fire Comprehensive Report & Timeline[R]. Columbia: Fire Safety Research Institute.

Maranghides A, Link E, 2023. WUI Fire Evacuation and Sheltering Considerations: Assessment, Planning, and Execution (ESCAPE)[R]. Gaithersburg: NIST.

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2022. The chemistry of fires at the Wildland-urban interface[R]. Washington: The National Academies Press.

Nugent A D, Longman R J, Trauernicht C, et al, 2020. Fire and rain: the legacy of hurricane lane in Hawaii[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(6): E954-E967.

Shuman J K, Balch J K, Barnes R T, et al, 2022. Reimagine fire science for the Anthropocene[J]. *PNAS Nexus*, 1(3): pgac115.

The White House, 2023. President's Council of Advisors on Science and Technology[EB/OL]. [2024-05-17]. <https://www.whitehouse.gov/pcast>.

U.S. Fire Administration, 2022. Wildland urban interface: a look at issues and resolutions[EB/OL]. [2024-05-17]. <https://www.usfa.fema.gov/downloads/pdf/publications/wui-issues-resolutions-report.pdf>.

(作者单位: 中国气象局气象发展与规划院)

(编辑: 卢冰)