

林火燃烧环境对灭火效果的影响研究*

王振师¹ 魏书精¹ 谢继红^{1,2} 钟映霞¹
李小川¹ 唐洪辉^{1,2} 吴泽鹏¹ 周宇飞¹ 李 强¹

(1. 广东省森林培育与保护利用重点实验室 / 广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520;

2. 广东森科园林绿化工程有限公司, 广东 广州 510520)

摘要 以2017年8月23日珠海市遭受强台风“天鸽”的正面袭击后凤凰山森林可燃物调查和2017年12月20日发生在凤凰山森林火灾火行为变化为基础, 根据台风灾害前后森林可燃物载量的变化状况, 分析了台风灾害后林火特点, 比较了不同灭火方法对灭火效果的差异。结果表明, 随着台风灾害后林火燃烧环境的改变, 导致灭火的难度增加, 采取以水灭火和直升机吊桶洒水灭火, 能有效扑灭可燃物大幅度增加后的森林火灾, 灭火效果较好。研究发现, 台风灾害后导致的森林可燃物大量增加, 影响林火燃烧环境和林火行为, 对于此类的森林火灾, 应根据林火环境特征采取针对性灭火措施, 从而提高灭火效果, 有效保护森林资源。

关键词 台风灾害; 森林火灾; 林火燃烧环境; 灭火效果

中图分类号: S762 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2019) 02-0084-05

Effect of Forest Fire Combustion Environment on Forest Fire Suppression

WANG Zhenshi¹ WEI Shujing¹ XIE Jihong^{1,2} ZHONG Yingxia¹
LI Xiaochuan¹ TANG Honghui^{1,2} WU Zepeng¹ ZHOU Yufei¹
LI Qiang¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. Guangdong Senke Landscaping Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract This paper is based on the investigation of forest fuel load in Fenghuang Mountain, which finished after the attack of strong typhoon “Tiangge” in Zhuhai city on August 23, 2017 and the change of forest fire behavior on December 20, 2017. According to the change of forest fuel load before and after typhoon disaster, the characteristics of forest fire after typhoon disaster were analyzed, and the differences in fire suppression effect between different fire suppression methods were compared. The results showed that with the change of forest fire environment after typhoon disaster, the difficulty of fire suppression was increased. Water fire suppression and helicopter bucket sprinklers were used to extinguish fires, which could effectively extinguish forest fires with greatly increased combustibles, and the fire suppression effect was better. It was found that the increase of forest fuel load after typhoon disasters affects the burning environment and behavior of forest fires. For such forest fires, specific fire suppression measures should be taken according to the environmental characteristics of forest fires, so as to improve the fire suppression effect and effectively protect forest resources.

Key words typhoon disaster; forest fire; forest fire combustion environment; fire suppression effect

* 基金项目: 广东省林业科技创新计划项目 (2017KJCX047); 广东省林业科技创新计划项目 (2018KJCX003)。

第一作者: 王振师 (1962—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事森林防火研究, E-mail: wshenshi@163.com。

通信作者: 魏书精 (1979—), 男, 副研究员, 主要从事森林防火及森林生态研究, E-mail: weishujing2003@163.com。

台风灾害是沿海地区森林生态系统重要的非生物干扰因子^[1-3], 造成沿海地区森林生态系统结构和功能产生变化^[4-5]。台风可以造成树皮撕裂、折干、枝条折断、大量落叶和连根拔起, 引起小面积范围内的个体死亡, 产生大量的林窗, 导致郁闭度减少、透光性增强等^[6]。台风灾害产生大量的死木和断枝落叶, 增加了林地可燃物载量、改变了可燃物的分布和类型, 从而影响森林的燃烧性。近年来, 学者们研究了台风灾害对森林生态系统的影响, 主要集中在植被动态、森林林冠和密度、森林群落机械损伤、凋落物特征、水文功能规律、土壤流失量和生态系统影响等方面^[7-12], 但台风灾害后林分环境的变化, 对林火行为的影响研究未见报道。2017年8月23日, 珠海市遭受强台风“天鸽”的正面袭击, 对森林环境造成重大破坏, 2017年12月20日珠海市凤凰山发生森林火灾, 并因为林火燃烧环境的改变导致灭火的难度增加。本文通过对火灾的林地可燃物调查、林火特点分析和不同方法灭火效果比较, 筛选能有效扑灭可燃物大幅度增加的森林火灾的最佳灭火方法, 为台风灾后的森林火情控制提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

珠海市位于广东省珠江口的西南部, 东与香港隔海相望, 南与澳门相连, 西邻江门市新会区、台山市, 北与中山市接壤, 经纬度为 $21^{\circ}48' \sim 22^{\circ}27' \text{N}$ 、 $113^{\circ}03' \sim 114^{\circ}19' \text{E}$ 之间。珠海市地处珠江口西岸, 濒临广阔的南海, 属典型的南亚热带季风海洋性气候。年平均气温 22.5°C , 平均相对湿度80%, 年平均降雨量达到2061.9 mm。珠海的灾害性天气主要是台风和暴雨, 个别年份冬季受寒潮低温影响。台风出现的时间多在6月至10月, 年平均4次左右, 严重影响珠海市的台风平均每年1次, 暴雨有5次左右。

凤凰山森林公园位于珠海市东北面, 面积约7000 hm^2 , 森林覆盖率达90%以上, 现有的森林植被类型为人工林, 以针叶纯林、针阔混交林和阔叶混交林为主。在山顶区域分布着灌丛及草丛群落, 除山脊线处相对平缓外, 坡面大都相对陡峭, 山体植被东侧以改造后的生态林为主, 西侧为人工次生林; 南山山系山体坡度在 $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$

之间, 坡面陡峭, 森林植被主要有大叶相思(*Acacia auriculiformis*)、湿地松(*Pinus elliottii*)、马占相思(*Acacia mangium*)、尾叶桉(*Eucalyptus urophylla*)、荷木(*Schima superba*)、黎蒴(*Castanopsis fissa*)等树种为主。在沟谷、村边有天然次生植被散布, 主要乔木树种有樟树(*Cinnamomum bodinieri*)、鸭脚木(*Schefflera octophylla*)、大头茶(*Gordnia axillaris*)、假苹婆(*Sterculia lanceolata*)、小叶榕(*Ficus benjamina*)、阴香(*Cinnamomum burmanni*)等, 灌木包括桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、岗松(*Baeckea frutescens*)、车轮梅(*Rhaphiolepis indica*)、野牡丹(*Melastoma candidum*)等, 草本主要为芒箕(*Gleichenia linearis*)、芒(*Miscanthus sinensis*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、蔓生莠竹(*Microstegium vagans*)等

2017年12月20日下午18时50分, 珠海市凤凰山塘抱石水库尾发生森林火灾(起火点位置经纬度为 $22^{\circ}19'38'' \text{N}$ 、 $113^{\circ}32'18'' \text{E}$)。经省市联合扑救, 于22日凌晨3时许, 明火全部扑灭。火烧有林地面积约76.95 hm^2 , 海拔130~350 m, 坡度约 20° , 呈块状分布, 属高丘山地。

1.2 可燃物载量调查

台风灾害后2 w内, 在珠海市凤凰山大叶相思林、马占相思林、尾叶桉林、湿地松林、荷木林和黎蒴林的火烧迹地及未火烧地采用随机布点法设置标准样地, 在各林型的火烧迹地及未火烧地分别设置3个20 m $\times$ 20 m的标准样地, 共设置标准样地36块。采集样地内乔木、灌木、草本和凋落物等样品。以5 cm为起测胸径(5 cm以下胸径的小树作为灌木进行测定), 调查样地内树种的胸径、树高、郁闭度、林分生长状况等^[13], 分树种统计各径级的平均值。根据灌木分布的均匀程度沿标准样地的对角线设置小样方5个, 当分布较为均匀时设置5个2 m $\times$ 2 m样方, 当分布不均匀时设置5个5 m $\times$ 5 m样方。调查灌木层的盖度、株数和平均高度, 各树种数量、地径、高度等, 然后分种类收集样方内的全部灌木, 称量并取样^[14]。在设置好的标准样地内沿另一对角线设置5个1 m $\times$ 1 m的样方, 调查草本层种类、盖度和平均高度, 然后全部收割(包括草的根)、称量并取样。在标准样地内按对角线选取5个1 m $\times$ 1 m样方, 收集小样方内的凋落物(枯

表 1 珠海市凤凰山主要树木受害情况调查
Tab. 1 Investigation on the main tree damage of Fenghuang Mountain in Zhuhai city

树种 Species	平均胸径 /cm Average DBH	平均树高 /m Average tree height	郁闭度 Canopy density	调查数量 / 株 Number of surveys	枝叶受损 / 株 Damaged branches and leaves	树枝折断 / 株 Branch breaking	树干折断 / 株 Trunk breaking	整树倒伏 / 株 Whole tree lodging	林龄 Forest age/a
大叶相思 <i>Acacia auriculiformis</i>	13.07 ± 2.33	15.05 ± 4.62	0.70	50	20	20	5	5	12
马占相思 <i>Acacia mangium</i>	15.33 ± 3.26	18.26 ± 5.86	0.75	50	10	30	2	0	12
尾叶桉 <i>Eucalyptus urophylla</i>	15.07 ± 3.90	19.28 ± 5.39	0.75	60	23	30	4	3	8
湿地松 <i>Pinus elliotii</i>	15.79 ± 4.33	16.27 ± 3.29	0.70	40	32	5	2	1	12
荷木 <i>Schima superba</i>	12.52 ± 3.56	10.29 ± 2.17	0.75	30	19	11	0	0	21
藜蒭 <i>Castanopsis fissa</i>	16.23 ± 2.18	17.15 ± 3.62	0.80	17	7	10	0	0	17

注：表中胸径和树高数据为平均值 ± 标准差 Note: The DBH and height data in the table mean average ± SD

枝和落叶、针叶和阔叶分开)，记录其鲜质量并取样^[14]。珠海市凤凰山主要树木受害调查见表 1。

1.3 可燃物载量测定

乔木层可燃物载量估算采用生物量与蓄积量的回归方程。根据珠江三角洲各主要树种的生物量回归方程计量各树种单位面积生物量^[15-16]。灌木层通过计算含水率的方法推算单位面积内的生物量。样品经 85 ℃ 恒温烘干至恒质量，用精度 0.01 g 的电子天平称干质量，计算样品不同器官的含水率，不同器官的生物量相加可得出单位面积的生物量^[13]。可燃物含水率计算公式^[14]为可燃物含水率 = (湿重 - 干重) / 干重 × 100%。

1.4 林火的火环境、火行为和扑火方法

林火环境、火行为分析和不同灭火方法的效果分析等数据来源于森林火灾发生后，扑火前线指挥部对火灾现场的调查和观测，以及气象部门和林业管理部门的有关报告。

2 结果与分析

2.1 台风灾害对林分环境的影响

台风灾害对林分造成的表现为，受 9~10 级危害的树木主要表现为落叶 + 折树枝；受 11~12 级危害的树木主要表现为落叶 + 折树枝 + 折树干。珠海市气象监测在 2017 年 8 月 23 日 12 时 10—15

分之间观测到 14 级（45 m/s），并有 51.9 m/s（16 级）的瞬时大风，造成了市内大量绿化树木的折断和连根刮倒。林区林分树木也受到了严重损害，沿海防护林、景观林和生态保护林也受到影响。台风灾害后林木大量风折，林分郁闭度由 0.7 降低至 0.3~0.4。进入秋、冬季节后，受季节性天气影响，林内环境湿度和可燃物含水量都会降低，森林可燃物的燃烧性提高。

2.2 台风对林地可燃物载量的影响

台风灾害后林地可燃物载量变化情况见图 1。调查结果显示大叶相思、马占相思、尾叶桉、湿地松、荷木、藜蒭林分中，由灌木、草本、凋落物组成的可燃物，每公顷载量分别为 14.23、13.84、10.61、16.41、10.36、14.42 t，各种林分可燃物载量平均为 13.31 t/hm²。台风灾害后各林分可燃物载量分别达到 70.71、85.24、64.35、53.64、28.21、33.22 t，森林可燃物载量平均为 41.92 t/hm²。与台风灾害前相比，可燃物载量分别增加了 396.91%、515.90%、468.80%、226.87%、172.30% 和 130.37%。调查发现，台风灾害后增加的可燃物主要是风倒的树木、风折的树干、树枝等粗大木质。

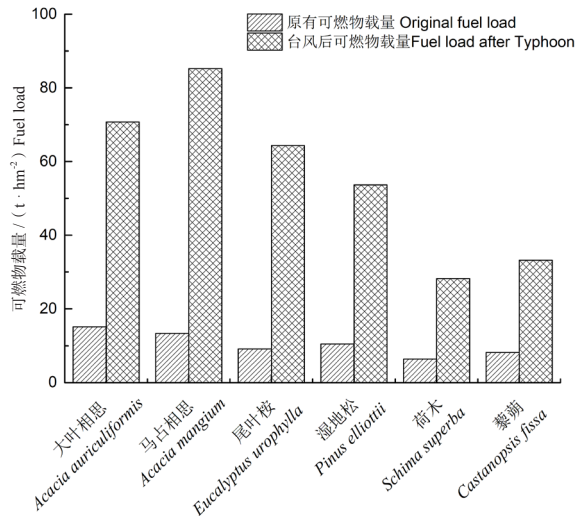


图1 台风灾害后林地可燃物载量变化

Fig. 1 Changes in fuel load of forest land after typhoon disaster

2.3 森林火灾的林火环境分析

珠海市凤凰山最高峰为海拔426.0 m，南北宽约10 km，东西宽约12 km。森林火灾发生在凤凰山塘抱石水库尾(图2)，起火点在凤凰山腹地，海拔约350 m，属远山地段，林分以尾叶桉、大叶相思、湿地松、湿地松与荷木、黎蒴等多种阔叶树混合林为主。台风灾害后林分郁闭度降低、林内湿度降低。气候报告说明已21 d无明显降水，日平均气温8.9~23.5℃，事发当天有5~6级东北风。火环境特点是火场地形复杂、可燃物载量大、持续干旱和大风天气。



图2 凤凰山森林火灾火场位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the fire location of Fenghuang Mountain forest fire

2.4 森林火灾的林火行为分析

受大风天气、山地环境和林地可燃物载量增加的影响，山火快速向山上和周围的山坡蔓延，现场出现多个火头、火强度极高，形成地表和林冠混合火，火焰高度达10 m以上，火灾发生

5 h后，火场面积已超过20 hm²，火线长3 km以上，火线已蔓延至凤凰山东坑山顶附近，威胁珠海市全市输电线路、高速公路和附近住宅区的安全，极有可能发展为特大森林火灾。林火行为特点为火头多、火线长、火蔓延速度快、燃烧时间长(图3)。

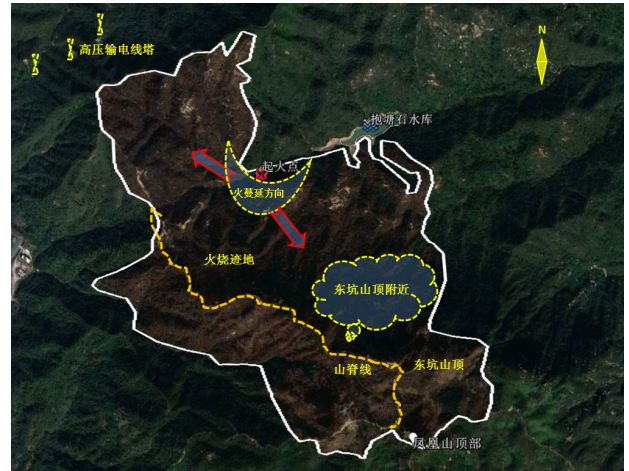


图3 凤凰山森林火灾林火蔓延示意图

Fig. 3 Schematic diagram of forest fire spread in Fenghuang Mountain forest

2.5 不同方法的灭火效果分析

火灾发生后，珠海市立即调集当地森林消防专业队开展扑火救灾，受林火环境和林火行为的影响，人工扑打、风力灭火和开设隔离带等方法都无法控制火势蔓延。后经省森林防火指挥部调集3支以水灭火专业队和两架K-32直升机前往增援，在东南面火线采用高压消防车输水灭火、在西北面火线采用水罐车与消防水泵驳接输水灭火、在抱石水库附近采用便携消防水泵在水库中抽水灭火；在无道路到达和火强度高的凤凰山东坑山顶附近，采用直升机吊桶洒水灭火，这些灭火方法都取得了良好效果(表2)。

3 结论与讨论

受强台风侵袭，森林环境受到了严重破坏，灾后林分可燃物载量增加3~5倍，林冠层受害使林分郁闭度大幅度降低，林分环境内风速加快。在大风干旱天气环境下，枯枝落叶含水率快速降低，由此引发的森林火灾火势猛、蔓延速度快、灭火难度大。通过对凤凰山森林火灾采用人工扑打、风力灭火、隔离带阻隔、以火灭火、以水灭火和直升机吊桶洒水灭火等扑火方法的比较，结果表明，以水灭火和直升机吊桶洒水灭火是扑救

表 2 不同灭火方法与灭火效果比较

Tab. 2 Comparison of different fire suppression methods and fire suppression effects

灭火方法 Fire suppression method	主要装备 Main equipment	适用火场的特点 Characteristic of applicable fire field	效果 Effect
人工扑打	二号工具等	火焰高度小于 1 m，低强度地表火	差
风力灭火	风力灭火机	火焰高度小于 1.5 m，低强度地表火	差
隔离带阻隔	油锯、割灌机、长柄镰刀、 锄、铲等	有安全依托地段	差
以火灭火	镰刀、油锯、割灌机、点火 器、风力灭火机	地形陡险，深山、高山大面积地表火和林冠火的混合 火，高强度的地表火或火线较长的下山火	差
以水灭火	森林消防水车	道路条件好，火线距公路 300 m 以内	差
	高压消防水车	道路条件好，火线距公路 3 km 以上	好
	便携消防水泵	有小路到达，火线与水源距离在 1 km 以内	好
	水罐车与水泵组合	有小路到达，火线与水源距离 3 km 以上	好
直升机吊桶洒水灭火	K-32 直升机吊桶	地势高、坡陡险，火强度高的火头，无路到达的火线	好

台风灾害后林地火灾的有效方法。

我国地缘辽阔，林业的灾害多种多样，除东南沿海地区的台风灾害外，大风、雨雪冰冻、干旱和病虫害等灾害都会造成森林环境的变化和林内可燃物的增加，为森林火灾的发生提供了条件。为预防灾害后森林火灾的发生，应加快清理林缘林内的可燃物，清理道路两侧和进山道路的可燃物，开设林火阻隔带形成新的林火阻隔体系；同时，应加大野外火源的管理力度，加强森林消防队伍以水灭火技能的演练，熟悉巡林地环境，充分利用自然环境和扑火方法，完善扑火预案，才能有效控制和扑灭林火。

参考文献

[1] NYKNEN M L. Factors affecting snow damage of tree with particular reference to European conditions[J]. *Silva Fennica*, 1997, 31(2): 193-213.

[2] ULANOVA N G. The effects of windthrow on forests at different spatial scales[J]. *For Ecol Manag*, 2000, 135(1-3): 155-167.

[3] 洪奕丰, 李浩然, 刘强, 等. 台风灾害对文昌市的林业干扰影响因子分析[J]. *华东森林经理*, 2012, 26(4): 42-49.

[4] SCHELHAAS M J, NABUURS G J, SCHUCK A. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries[J]. *Glob Chang Biol*, 2003, 9(11): 1620-1633.

[5] 孙洪刚, 林雪峰, 陈益泰, 等. 沿海地区森林风害研究综述[J]. *热带亚热带植物学报*, 2010, 18(5): 577-585.

[6] 刘斌, 潘澜, 薛立. 台风对森林的影响[J]. *生态学报*, 2010, 32(5): 1596-1605.

[7] WANG Q, YU D, LI Z Q. The effect of typhoons on the diversity and distribution pattern of aquatic plants on Hainan Island, South China[J]. *Biotropica*, 2008, 40(6): 692-699.

[8] 李意德, 周光益, 林明献, 等. 台风对热带森林群落机械损伤的研究[J]. *生态学杂志*, 1998, 17(S1): 9-14.

[9] WU Z M, DU Z H, LIN M X, et al. Effect of tropical cyclone and typhoon on the litterfall of the tropical mountain rain forests in Hainan Island[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1998, 17(S1): 26-30.

[10] 周光益, 陈步峰, 李意德, 等. 热带林生态系统对台风暴雨的再分配规律[J]. *生态学杂志*, 1998, 17(S1): 31-36.

[11] 周光益, 吴仲民, 陈步峰, 等. 尖峰岭不同降水条件下无林与有林地坡面土壤流失量比较[J]. *生态学杂志*, 1998, 17(S1): 42-47.

[12] 仝川, 杨玉盛. 飓风和台风对沿海地区森林生态系统的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(12): 5337-5344.

[13] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 等. 大兴安岭 5 种典型林型森林生物碳储量[J]. *生态学报*, 2015, 35(17): 5745-5760.

[14] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 等. 小兴安岭 7 种典型林型林分生物量碳密度与固碳能力[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(2): 140-158.

[15] 杨昆, 管东生. 珠江三角洲地区可燃物载量及其动态[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(4): 705-712.

[16] 杨昆, 管东生. 珠江三角洲森林的生物量和生产力研究[J]. *生态环境*, 2006, 15(1): 84-88.