

森林草原 火灾扑救安全学

赵凤君 舒立福 等◎编著



中国林业出版社

森林草原 火灾扑救安全学

赵凤君 舒立福 等◎编著

中国林业出版社

内容简介

全书共分10章。主要介绍森林草原火灾燃烧过程、森林草原火灾扑救原理与扑救技术、森林草原火灾扑救危险源、扑救伤亡事故分析、扑救危险性评价和扑救安全防范与管理等内容。归纳了森林草原火灾扑救实际工作中的扑火技术和安全防范措施,整理和分析了国内外森林草原火灾扑救中造成较大伤亡的案例。

本书可作为有关森林草原防扑火专业方向的本科生、研究生的教学参考书,也可作为各级森林草原扑火指挥员和扑火队员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

森林草原火灾扑救安全学 / 赵凤君, 舒立福等编著. -- 北京:
中国林业出版社, 2015.12
ISBN 978-7-5038-8264-7

I.①森… II.①赵… III.①森林灭火-技术培训-
教材 ②草原-灭火-技术培训-教材 IV.①S762.3 ②S812.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第284933号

中国林业出版社·生态保护出版中心

责任编辑:刘家玲

出版 中国林业出版社(100009 北京西城区德内大街刘海胡同7号)
<http://lycb.forestry.gov.cn> 电话:(010)83143519
发行 中国林业出版社
印刷 中国农业出版社印刷厂
版次 2015年12月第1版
印次 2015年12月第1次
开本 889mm×1194mm 1/32
印张 7.5
字数 260千字
定价 48.00元

《森林草原火灾扑救安全学》

编委会

主 编：赵凤君 舒立福

副主编：刘晓东 王明玉 田晓瑞

编 者：刘晓东 田晓瑞 王明玉 舒立福

周汝良 文东新 王秋华 杨 光

杜建华 何 诚 单延龙 赵凤君

前言

森林草原火灾是当今世界上破坏性最大、救助极为困难的自然灾害之一，扑救森林草原火灾具有极高的危险性，稍有不慎就会使救灾人员瞬间变成受害者。据统计，全世界每年发生森林草原火灾20万起以上，烧毁森林草原面积达几百万至上千万公顷。1950~2001年，我国发生森林火灾70万起，受害森林面积达3500多万公顷，扑火伤亡32000多人，其中死亡4800多人。森林草原火灾因受气象、地形和可燃物三大自然因素的影响，火场变化无常，给扑火人员带来了极大的危险。目前，国内外在扑救火灾中人员伤亡还时有发生，在世界上森林草原火灾造成人员伤亡最多的一起达1500余人，我国森林草原火灾造成人员伤亡最多的一起达200余人。因此，世界各国都非常重视森林草原扑火安全工作。

美国、加拿大、澳大利亚等西方发达国家灭火装备很先进，也提出了灭火作战“零伤亡”的概念，但这也只是一个理想的目标，他们在扑救森林草原火灾中，扑火队员和居民发生伤亡的情况也时有发生。越来越多的火灾促使重新调整林火管理政策，美国在1995年开始执行的林火管理政策中明确：公众与扑火队员的安全为第一优先；扑救成本要最小，应综合考虑安全、被保护的价值；保护的重要性排序是生命第一、财产与其他的保护第二，等等。其他各国也有相应的措施来保障扑火人员的安全。美国和加拿大进行的许多研究表明：大多数扑火队员是在小火、极轻型可燃物里或在大火中相对平静的地区被烧死的。发生这种事情是因为小火或平静的大火给人一种错误的安全感。

森林草原火灾的发生与蔓延是在开放系统环境下进行的，时间和地点

有很大的随机性。扑火队员的行动围绕森林草原火灾发生、蔓延的时间地点来进行，这就增加了扑火队员发生事故的危险性，因此要求扑火队员有良好的身体和心理素质，掌握好安全防范措施。不论从事什么样的扑火任务，扑火人员的身体总要受到一定的消极影响，这在很大程度上取决于工作环境中氧气是否充足，以及通风、噪声、震动、扑火机具设备和食品饮料用水等状况如何。扑火人员经常处于恶劣的状况，即使有各种防护装备和器材，仍有可能在火灾中烧伤、摔伤、烟气中毒或受到其他伤害。

随着全球变暖，森林草原火灾发生有上升趋势，保护环境资源的任务将越来越繁重，加之我们的扑火装备和防护装备相对落后，扑火队员多与火直接接触，出现扑火危险性的概率远远高于西方发达国家，扑火队员生命安全的潜在威胁将长期存在。因此，对扑火安全及对策问题的研究有着十分重要的现实和深远意义。通过对森林草原火灾扑救中的安全问题进行研究，对影响火灾扑救安全的各种主要因素和基本特征进行系统了解、全面掌握，研究各种影响扑火人员安全的内在因素和规律，在此基础上提出的安全措施，可以为各级扑火指挥员和扑火人员采取有效的扑火措施提供重要参考，切实保证扑火人员的安全，提高扑火效率，减少由于森林草原火灾带来的经济损失。

森林草原火灾扑救是人与自然灾害的抗争，也是一种紧张、激烈的高危性作业，稍有不慎就可能造成人员伤亡，全国每年在扑救森林火灾过程中，都有重大伤亡事故发生。为提高扑火安全性，确保扑火人员的人身安全，依据为研究生授课讲义、有关扑火安全研究成果及国内外相关资料，结合伤亡事故的案例分析编写了本书。由“十二五”国家科技支撑计划项目（2011BAD32B05、2013BAC09B02、2012BAC19B02）、林业公益性行业专项（201204507）、国家自然科学基金项目（31170618、31470658）资助出版。本书立足于符合扑火实际，通俗易懂，便于操作的原则，分别就扑火人员迫切需要掌握的火线危险因素、火场安全指挥管理、火场安全防范措施等内容进行了阐释。

由于时间仓促，水平有限，本书的内容还不尽完善，一些观点、方法难免存在错误和不足，恳请广大读者批评指正。

编著者

2015年2月

目 录

前 言

第一章 森林草原火灾燃烧基础 / 1

第一节 森林草原燃烧三要素 / 2

第二节 森林草原燃烧过程 / 6

第三节 森林草原燃烧中的热量传递 / 11

第二章 森林草原火灾的扑救原理及影响因素 / 15

第一节 森林草原火灾扑救原理与原则 / 15

第二节 森林草原火灾扑救过程 / 17

第三节 森林草原火灾扑救的影响因素 / 19

第三章 森林草原火灾的扑救 / 35

第一节 森林草原火灾扑救的方法 / 35

第二节 森林草原火灾扑救技术 / 38

第三节 典型森林草原火灾扑救技术 / 43

第四章 森林草原火灾扑救安全 / 53

第一节 森林草原火灾扑救危险源 / 53

第二节 特殊火行为对扑火安全的影响 / 58

第三节 森林草原火灾扑救火环境 / 64

第五章 森林草原火灾扑救伤亡事故分析 / 75

第一节 火灾扑救伤亡事故风险 / 75

第二节 火灾扑救过程中的伤亡事故分析 / 85

第三节 扑火人员的主要伤害及应对措施 / 90

第六章 森林草原火灾扑救安全评价 / 107

第一节 安全评价的过程与内容 / 107

第二节 森林草原火灾扑救危险评价指标 / 114

第三节 森林草原火灾扑救危险性评价模型 / 121

第七章 森林草原火灾扑救安全防护 / 135

第一节 扑救火灾时人的生理、心理反应和行为 / 135

第二节 扑火人员生理、心理防护 / 140

第三节 扑火安全防护技术措施 / 147

第八章 森林草原火灾扑救安全管理 / 163

第一节 火灾扑救安全规章制度 / 163

第二节 火灾扑救安全保护措施计划 / 165

第三节 火灾扑救安全管理目标与对策 / 171

第九章 森林草原火灾扑救安全现状与进展 / 181

第一节 火灾扑救安全研究现状 / 181

第二节 火灾扑救安全防护及设备 / 189

第三节 火灾扑救安全技术发展展望 / 194

第十章 森林草原火灾伤亡案例 / 197

第一节 世界上伤亡较大的森林草原火灾 / 197

第二节 国内伤亡较大的森林草原火灾 / 208

参考文献 / 225



第一章

森林草原火灾燃烧基础

燃烧是一种自然现象，是可燃物被氧化时放热发光的一种现象。严格意义上讲，燃烧包括各种强烈氧化放热反应或各类氧化反应（氮化、氟化、氯化），及强烈的放热分解反应（如联氨分解），或者其他放热反应，反应过程中有基态和激发态的自由基、原子、电子及离子出现，并伴有光辐射现象。

火是一种典型的燃烧现象。森林草原火是森林草原中可燃物燃烧现象的总称，既包括造成损失的森林草原火灾，也包括带来益处安全营林用火。森林草原燃烧指森林草原内的各类型可燃物，在一定的温度条件下，快速与空气中的氧气结合，发生放热发光的化学反应。

第一节 森林草原燃烧三要素

任何燃烧现象的发生必须同时具备三个基本条件,即可燃物、助燃物(氧气)和一定的温度,三者缺一不可,称燃烧三要素,也称燃烧三角(图1-1)。森林草原可燃物燃烧也不例外,其燃烧的三个基本条件可具体为:森林草原可燃物、空气和火源,称森林草原燃烧三要素,也称森林草原燃烧三角(图1-2)(下文的燃烧三要素均指森林草原燃烧三要素)。燃烧三角形象地描述了燃烧三要素的重要性,三者之间互相依赖、互相作用,缺一不可,扑救森林草原火灾时,只要消除其中一个要素,火就会被扑灭。

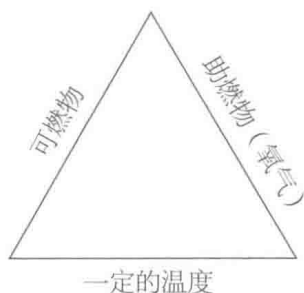


图1-1 燃烧三角

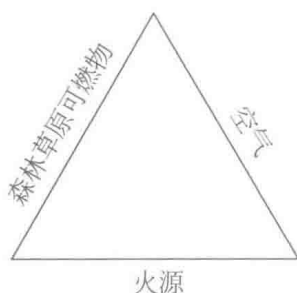


图1-2 森林草原燃烧三角

一、森林草原可燃物

凡是能与氧或氧化剂起燃烧反应的物质均为可燃物,可燃物一般为有机物,森林草原中的所有有机物都是可燃物,其分布从空中到地下泥炭层(图1-3)。在空气存在的情况下,可燃物被加热至 260°C 时就会产生火焰。枯草、落叶和小枝为细小可燃物,它们的燃烧构成了移动火线的主要部分。细小可燃物主要位于表层,它们决定着火前进的速度和火线前沿火焰的高度。细小可燃物燃烧形成的火焰是火线前沿热辐射的主要来源,因此火焰在细小可燃物的蔓延会有一段停留时间,约 $5\text{s}\sim 1.5\text{min}$,对于一般的森林火灾来说,这期间由于要加入细小

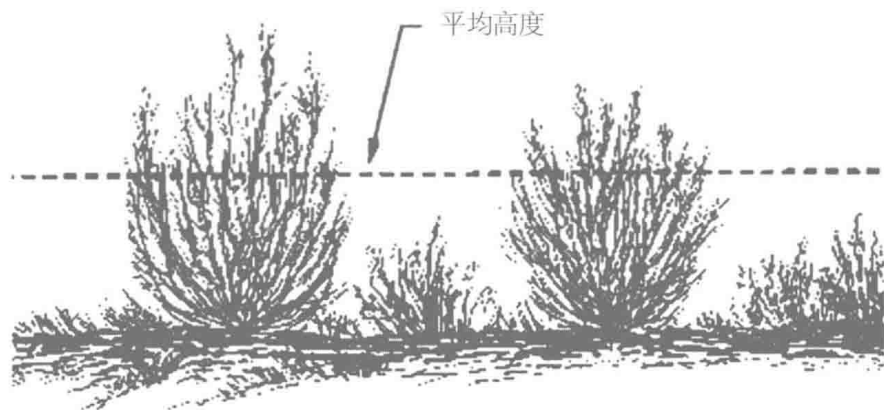


图1-3 可燃物分布示意图

可燃物，火强度会大幅降低。可燃物中大的树枝和树干不在火线前沿燃烧，而是在火行进中或闷烧阶段燃烧，它们的燃烧形成了背景热释放，释放热量的大小依赖于能燃烧的可燃物的数量及它们的含水量。

二、火源

森林草原可燃物，在温度升高到一定值时，才能发生燃烧现象。达到这样高的温度，必须通过外界的热源加热和可燃物自身分解产生的可燃性气体的燃烧放热来完成。外界的热源，就是能引起森林草原燃烧的火源。

火源是森林草原火发生的必要条件，火一旦发生，它就能产生维持燃烧的热量，而不再需要外界的热源。野外环境中有许多火源，其中因人为原因产生的火源是最普遍的，如火柴火、香烟头、发动机排出的火花、重油渣等；自然原因产生的火源较少，常见的有雷击火、火山爆发、陨石降落和泥炭自燃等，其中雷击火是主要的自然火源。不同的火源有不同的发热量，出现的区域也不相同。常见火源的发热量如表1-1所示。森林草原中，有火源也不一定就会发生燃烧，只有当火源的发热量超过被引燃可燃物燃烧所需的热量时，燃烧现象才会出现。表1-2列出了各种可燃物与火源相遇后的燃烧特征。

表1-1 常见火源发热量

火源名称	质量 (g)	形状	发热量 (J/g)	出现区域
重油渣	0.5	小块	1672	道路两侧
煤	0.5	小块	1194	铁路两侧
火柴杆	0.05	小长方块	1103	林内外
香烟头	0.4	小圆柱	1194	林内外
火星	0.001	颗粒	1194	草地、干草堆
纸张	0.01	片状	1194	荒草地

表1-2 火源落到森林草地上可能出现的燃烧特征

火源掉落位置	燃烧特征
土地	熄灭
枯草	慢慢燃烧
细小枯枝	极缓慢燃烧
密集茅草	迅速燃烧
刨花或落叶层	缓慢燃烧
木屑或腐殖质层	烧成空穴

三、空气

森林草原燃烧中氧气是助燃物。空气中含有21%的氧气，约占空气的1/5。通常燃烧1kg的木材，大约需要 $3.2 \sim 4.0\text{m}^3$ 的空气，需要纯氧 $0.6 \sim 0.8\text{m}^3$ 。在常温下，氧化作用非常缓慢，如铁在空气中氧化生锈就是一个非常缓慢的过程；而森林草原燃烧则是另一类的氧化反应，在高温作用下，氧被活化，活化氧很容易与可燃物结合发生

化学反应，生成氧化碳和水，并释放出大量的热量，这些热量可促使更多的可燃物燃烧，即形成一系列的连锁反应。因此，在森林燃烧过程中，必须有足够的氧气才能保证燃烧反应的完全和彻底。

气压、温度和相对湿度影响着空气中的氧气含量。表1-3中的数据表明，气压高、湿度低时，空气中氧气含量增加，有利于燃烧。当相对湿度小于或等于50%时，空气中氧含量较高，保持在21%的体积浓度，这时可燃物燃烧旺盛。当相对湿度升高时，空气中氧气含量降低，可燃物燃烧不那么旺盛。如果空气中的氧气含量减少到14%~18%体积浓度时，燃烧就会停止。

表1-3 气压、温度与空气含氧量的关系

气压 (hPa)	气温 (℃)	相对湿度 (%)	含氧量 (%)
933	22	100	18.8
933	22	90	18.8
933	22	85	18.9
933	22	80	19.9
1000	22	50	20.8~21.0

在森林草原的燃烧过程中，由于氧气供给的程度不同，会产生完全燃烧和不完全燃烧两种类型。可燃物达到完全燃烧时，生成二氧化碳、灰分和水蒸气，不能再次燃烧，但能释放较多的热量。不完全燃烧时产生可再次燃烧的产物，如一氧化碳、木炭等。不完全燃烧放出的热量较少，仅为完全燃烧放出热量的约 $\frac{1}{4}$ 。完全燃烧所需的空气量可以根据其化学组成进行计算来获得。当可燃物在缺氧严重的情况下燃烧时，只见冒出大量的烟雾，不见火焰，这种燃烧称为熏烧。

氧气是环绕地球大气的主要成分，而森林草原火通常发生在不封闭的空旷环境中，因此通过闷熄的方法来扑火是不现实的，除非火场小到足以用封闭的手段来扑灭的程度。

第二节 森林草原燃烧过程

一、森林草原的燃烧特点

与缓慢的腐朽和分解的氧化作用过程比较,可燃物燃烧是在相当高温情况下的快速氧化过程。燃烧时瞬间释放出巨大的热能、二氧化碳及水蒸气。森林草原燃烧与自然界中其他燃烧现象相比,除具有一般燃烧学特征外,还具有其自身的特点。

(1) 森林草原火是在森林草原这个开放系统中进行的自由燃烧,氧气的供应不受限制,因此可自由蔓延、自由扩展,这与城市火灾或工程锅炉内发生的燃烧是完全不同的。

(2) 森林草原的燃烧属固体燃烧。固体较气体或液体可燃物的燃烧要复杂得多,一般要经过液化、气化的过程,也就是说,可燃物必须先经热分解反应转变为可燃气态后,与空气相遇,达到一定温度时,才可在可燃物上方形成火焰。

(3) 森林草原可燃物为一个复杂体,既有枯死的可燃物,也有活的可燃物,且不同可燃物的易燃性、燃烧性及燃烧时释放出的能量差异很大。同时,森林草原可燃物在地域分布上差别明显,或多或少,或均匀或密集,或连续或间断,因此森林草原可燃物的燃烧在不同的可燃物条件下各具特点,表现很不一致,它的燃烧是所有燃烧现象中较复杂的一类,至今还不能对它进行完整的描述。

(4) 森林草原火的发生、蔓延及火行为特征,很大程度上受环境因子的影响和制约,主要包括:气候因子(大气候、地区气候、小气候),气象因子(空气温度、空气相对湿度、风速、风向、降水量),地形因子(坡度、坡向、坡位、海拔)等。

(5) 火灾中不同可燃物的消耗量差异很大,一场大火可把细小干枯易燃物全部化为灰烬,而对体积、重量较大且是湿的生长着的可燃物可能毫无损害。可燃物的消耗量主要取决于其表面积与体积的比、可燃物湿度和引燃物的热量。

(6) 森林草原燃烧还具有大面积和高强度的特点,可燃物被引燃后,火向四周扩展蔓延,火场面积可达数百万公顷;同时,火还可以由地表燃烧向上发展,特别是在针叶林可以发展成树冠火,地表火也可以向下发展,转变为地下火。

(7) 森林草原火作为一个生态因子,对森林和草原生态系统的影响具有两重性,既有破坏作用,也有促进作用。当人们对森林草原燃烧失去控制时,它不仅烧毁大片森林,危及人们的生命和财产安全,而且对森林和草原生态环境造成严重破坏。由此带来一系列恶果:水土流失、山洪暴发、虫灾等。当人们对森林草原燃烧很好地加以控制时,它具有有利的一面,可以促进能量转化,有利于生态平衡,加速森林的生长。双重性的关键是燃烧强度,高强度火往往带来破坏性的一面;控制性的低强度火则可带来有利的一面。

二、森林草原的燃烧过程

森林草原的燃烧一般先从草地、沟塘、林间空地、采伐迹地、道路两旁的杂草引起(这些地块被称为火灾的策源地),然后蔓延到疏林、密林,及至林冠。所以说无论地表火、树冠火或地下火,都是先从地面的干枯杂草发生的。在条件合适的时候,树冠火或地下火可以再次变为地表火。在高能量火行为发生时,这三种火类型往往同时存在。

森林草原火的发生及被扑灭的过程(图1-4)为:火的发生(点燃)、火蔓延(扩展燃烧)、火熄灭(熄灭)。

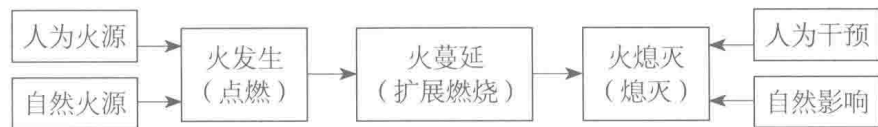


图1-4 森林草原火发生及被扑灭的过程示意图

森林草原的燃烧可划分为3个阶段,即预热阶段、炭化阶段和燃烧阶段。在森林草原燃烧的过程中,很容易看到这3个阶段,首先看

到燃烧区附近的树叶、杂草等预热卷曲干燥，然后出现火焰，最后看到较大可燃物的木炭燃烧。森林可燃物的燃烧过程见图1-5。



图1-5 森林可燃物燃烧过程

1. 可燃物预热阶段

可燃物在外界火源的作用下，可燃物温度逐渐上升，但此时温度上升速度非常缓慢。随后蒸发水分而逐渐干燥，局部发生分解，产生大量水蒸气和其他可燃的与不可燃的气体。这时由于水分蒸发消耗热量，每千克水汽化要消耗2514kJ热量，温度上升缓慢，氧化迟缓。随着大量水蒸气蒸发，产生大量的烟。虽有部分可燃性气体挥发，但还不能进行燃烧，这时可燃物处于收缩、干燥点燃前的状态。这个阶段主要是物理变化。

在该阶段中，可燃物被加热，不断逸出水分。开始是表面吸着水分被蒸发，然后是细胞腔内或细胞壁间水分被蒸发，最后是纤维素和半纤维素结合水被蒸发。除去水分要靠分子的扩散作用，因而这个过程受扩散控制。

2. 可燃物热解炭化阶段

随着温度的继续增加，可燃气体大量逸出，氧化过程加速，并产生大量的热，促使氧化反应加速，但还不能燃烧，只发烟。炭化阶段的实质就是森林可燃物的热解过程，即森林可燃物受热，其组成物发生热分解的过程。这一过程需要消耗能量，所以可燃物热解是吸热反应。在这一过程中可燃物迅速热解成可燃性气体，如一氧化碳、氢、甲烷等，以及焦油液滴（较大分子碎片），形成可燃性挥发物，逸向可燃物上方的空间。

（1）纤维素的热分解。纤维素热降解反应首先发生在无定形区

内,当温度升高时可发生在结晶区内。在通常情况下,纤维素在 162°C 开始明显的热分解反应,当温度达到 275°C 时,呈现出放热的热分解反应,释放出挥发性组分(可燃性气体一氧化碳、氢、甲烷等,水分和焦油液滴)。热分解后的残留物在没有氧时,则发生脱氢炭化反应,同时发生石墨化反应生成焦炭(图1-6)。

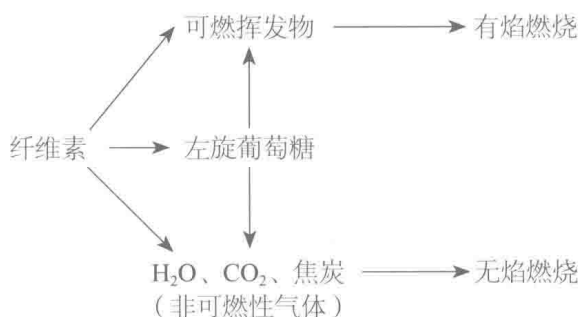


图1-6 纤维素的热分解和燃烧

(2) 半纤维素的热分解。半纤维素在 120°C 左右开始热降解反应, 150°C 左右发生剧烈的热分解反应,在 220°C 左右发生放热的分解反应,形成挥发性产物。半纤维素是木质物质中热稳定性最差的一种组分。

(3) 木素的热分解。木素是由苯丙烷基构成的交联芳香族高分子化合物。因为它含苯环,所以热稳性较其他组分好。不同的木素其热分解过程是不同的。通常,木素在 135°C 左右开始热降解反应,但开裂十分缓慢,在 250°C 时才开始明显的分解反应。首先,苯环上甲氧基脱落,形成甲醇。然后,丙烷基开裂,形成醋酸。在 $310\sim 420^{\circ}\text{C}$ 温度下反应十分剧烈,产生大量气体与蒸汽(一氧化碳、二氧化碳、甲醇、醋酸、木焦油等)。在 $450\sim 500^{\circ}\text{C}$ 温度范围内热分解反应接近終了。木素脱掉甲氧基和丙烷基后余下的芳香环缩合成焦炭,呈石墨状,使碳的含量高达96%以上。木素在快速加热时焦炭生成量减少,可燃挥发物量增加;相反,缓慢地加热时焦