

植被火生态与植被火管理

周道玮·主编

吉林科学技术出版社



植被火生态与植被火管理

周道玮 主编

吉林科学技术出版社

【吉】新登字 03 号

植被火生态与植被火管理

周道玮 主编

责任编辑：张瑛琳

封面设计：姜 凡

出版
发行

吉林科学技术出版社

787×1092 毫米 16 开本

印张：19.875

插页 4

500,000 字

1995 年 5 月第 1 版 1995 年 5 月第 1 次印刷

印数：1—1000 定价：26.00 元

印刷 长春电业印刷厂

ISBN 7-5384-1309-1/S·194

主 编	周道玮	
副主编	叶万辉	
编 委	马国青	国庆喜
	张喜军	王贵卿

内容提要

本书分三部分。第一部分论述了植物形态结构和养分利用及生存特性等对火状况的适应，第二部分论述了火状况对世界主要植被类型分布和结构的决定作用，哲理性地分析了研究文献的科学价值，第三部分评述了火生态研究结果在土地管理政策制定与土地管理实践中的意义，提出了植被管理与火管理的原则。

火是管理生态系统的重要自然工具，火状况由火频次(又称火周期、火轮回期或火间隔期)、火强度和火发生季节时间等要素组成，在表述某一生态系统火作用时，首先要理解此生态系统的火干扰状况。计划火烧是优秀的应用生态学范例。

前 言

自地球气候和植被形成, 植被火就一直存在。有证据表明, 50 万年以前, 古代北京人已知用火, 大英博物馆陈列着 60 万年前原始人在洞穴中保存火种的挂画, 云南元谋人遗址中发现有 170 万年前的大量碳屑和烧骨等人类用火遗迹。到旧石器时代后期, 人类最终掌握了人工取火的方法。恩格斯说: “而尽管蒸汽机在社会领域中实现了巨大的解放性的变革……但是毫无疑问, 就世界性的解放作用而言, 摩擦生火还是超过了蒸汽机, 因为摩擦生火第一次使人支配了一种自然力, 从而最终把人同动物界分开”(恩格斯, 反杜林论, 112 页, 人民出版社, 1970)。由于有了火, “人们便不受气候和地域的限制了; 他们沿着河流和海岸, 甚至在蒙昧状态中也可以散布在大部分地面上了”(马克思恩格斯全集, 21 卷 33 页, 人民出版社, 1965)。火的驯服使人类摆脱了茹毛饮血阶段, 并促进了人的生理、心理和意识进化。

在人类进程的很长一段时间内, 人类似乎遗忘了火的最初自然作用, 尽管还在用火改造自然, 如各地土著民族的传统刀耕火种、驱火移居、驱火游牧等, 但又开始变得惧火并防火。当然, 这是人类定居的结果, 但毕竟割裂了植被—火—人的自然关系, 使人对自然火的认识长期停滞不前, 这其中的另一个原因可能是火的长周期作用与个体人的有限寿命有关。

到了近代, 人们才又开始反思并追探认识自然火的自然功能, 并用现代科学思想加以评判。1849 年, 英国地理学家 Charles Lyell 最早在美国东南沿海平原记录了火烧引起长叶松更新现象, 并简述了原因, 土著印第安人火烧草地以为放牧和种植, 相应引起了硬杂木死亡, 导致长叶松更新起来。1888 年, 美国植物学家 Ellen Call Long 就认为长叶松的生活史中需要有火的作用, 这在当时被认为是梦人说吃。以后, 许多林学家和植物学家发现火烧对长叶松和火炬松引不起多少伤害, 且不同种所受的影响不同 (Charles Mohr, 1906; D. F. Schwartz 和 Thornton T. Munger, 1907; Max Rothkugel, 1907; W. W. Ashe, 1910; 1915; R. M. Harper, 1913; E. F. Andrew, 1917; H. H. Chapman, 1926; H. L. Stodard, 1935)。1917 年, 美国耶鲁大学林学院在长叶松林内设置样地, 开始研究火烧对森林的影响, 1925—1932 年, 美国第一个专业林学家 H. H. Chapman 系统地总结了火烧对长叶松的影响及长叶松林存在的条件。1923 年, H. L. Hensel 通过访问和调查开始了草原火自然作用研究。随后植被火自然作用的研究在北美和世界各地广泛开展起来 (K. H. Garren, 1943; I. F. Ahlgren 和 C. E. Ahlgren, 1960; R. F. Daubenmire, 1947, 1968; J. Phillips, 1972; A. M. Gill, 1974)。在此值得一提的是, 1910 年, F. Clements 出版了《西黄松林火历史》一书, 为野火建立了相似于进化论的理论基础, 通过进一步研究, Clements 于 1916 年系统地创建了群落演替理论。

1962 年 3 月, 美国塔拉哈西高大林木研究站 (Tall Timbers Forest Research Station, Tallahassee) 开始系统地收集火生态资料, 并召开了第一次火生态学研讨会, 以后每年召开一次, 并出会刊《Proceeding of Tall Timbers Fire Ecology Conference》, 每年一卷。本世纪 60—70 年代, 野火自然作用的文献大量涌现, 各种地区性和国际性研讨会频繁召开, 并出版了若干专题文集, 如《Fire ecology and the control and the use of fire in wildland management》(Tuc-

son, Arisona, 1969), 《Prescribed burning symp. proc.》(USDA For. Service, 1971), 《Environmental consequence of fire and fuel management in Mediterranean ecosystem》(Monney & Corad, 1977), 《Fire Regimes and Ecosystem Properties》(Mooney, 1981), 《Fire Effects on Wildlife Habitate》(J. E. Lotan and J. K. Brown, 1984)。同时, 各种专著相继问世, 如, 《Fire and Ecosystem》(Kozlowski, 1974), 《Fire in Austrilia Biota》(Gill et al, 1981), 《Fire in Forestry》(Chandler et al, 1983), 《Fire Ecology》(Wright & Bailey, 1981)。

Agee (1992, 通信) 将火生态学的研究历史分为三个阶段: 1900—1960 年, 认为火是“坏”的, 研究的较少且分散; 1960—1985 年, 对火的认识态度发生转变, 研究成果报告大量增加, 更好地理解火在自然环境中的作用规律; 1985 年以后, 火生态学做为扰动生态学的一部分被进行系统论述。事实上, 早在 1947 年, R. F. Daubenmire 就系统地论述了火因子的生态学地位, 并将其做为七类环境因子之一, 后续的大量研究工作证实了此论点。但不知什么原因, 火生态学的研究工作在我国一直未能广泛开展, 尽管老一辈生态学家做了开创性工作。

因为生态系统并不总是“风和日丽”, 因此, 研究火等干扰因子的生态学作用可以更好地理解生态系统的存在维持与发展变化。同时, 因为火等一些干扰因子具有可操作性, 因此可用以做为工具改善修饰生态系统的维持与发展, 或使之产生“畸形适应”发展出符合经营者目的的特征。由于火因子具特殊的灾害性, 因此全面了解火的自然作用和存在发展规律及扩展行为, 对于防火和用火并进行综合火管理及土地管理具有重要的理论意义和实践意义。

自九十年代初, 国际野火联合会 (International Association of Wildland Fire) 开始系统地整理火生态学资料, 列入计划的有《Wildland Fire Management Series》和《Wildland Fire Ecology Series》两个并行的理论和实践系列, 这对我们来说即是机遇也是挑战, 为此, 根据前述有关文献编辑 (译) 而成本文集, 企望能有助于我们了解世界这一研究领域的发展动态, 并借鉴已有成果, 转变和加深我们对野火自然作用的认识, 以利于管理我国的自然植被火并用火做工具管理自然植被和相应的生态系统。

编者

1995 年 5 月

目 录

第一章 植物对火状况的适应.....	(1)
第一节 结构特征与化学成分适应.....	(1)
第二节 生存特性的适应	(15)
第三节 养分利用的适应	(28)
第四节 繁殖特性的适应	(40)
第五节 生存对策的适应	(68)
小 结	(82)
第二章 植被格局与火状况	(83)
第一节 寒温带植被火状况	(83)
第二节 温带植被火状况.....	(110)
第三节 温带—暖温带植被火状况.....	(126)
第四节 热带植被火状况.....	(141)
第五节 草地植被火状况.....	(167)
第六节 荒漠和荒漠化草地火状况	(179)
第七节 澳大利亚植被火状况.....	(195)
小 结.....	(207)
第三章 植被管理与火状况.....	(210)
第一节 野火的非立地影响	(210)
第二节 刀耕火种的生态影响.....	(222)
第三节 植被管理与火作用.....	(234)
第四节 植被维持与火管理.....	(243)
第五节 火管理选择标准.....	(254)
第六节 制定火管理政策的约束力.....	(266)
小 结.....	(274)
参考文献.....	(279)

第一章 植物对火状况的适应

第一节 结构特征与化学成分的适应

【提要】虽然火是许多生态系统物理环境的自然组分,但林冠层结构形态的生物学特性和叶片的化学特性影响火频次和火强度。冠层结构影响燃烧所需的能量和能量释放速率。可燃物的化学成分影响其可燃性和可利用的能量。对适应火的植物来说,这些与燃烧性相关的性质可能具有重要的生态意义。

1 前言

有一种假说认为:在火类型生态系统 (fire-type ecosystems) 中,许多植物具有能促进燃烧性能的特性 (Mount, 1964; Jackson, 1968; Mutch, 1970),但缺乏明确的数据检验该理论。如果适应火的植物逐渐依赖于自然火的行为而进化,那么可望会产生一组特殊的适应特征来增进燃烧性能。目前还没有单一的指数来比较燃烧性能,但很多特性与燃烧性高度相关,它们可以数量化表示 (Philpot, 1977)。叶片可燃物的物理性质及其排列是其燃烧所需能量和能量释放速率的重要决定因素 (Countryman 和 Philpot, 1970)。化学特性影响点燃的时间和可燃物的热量 (Mutch, 1970; Philpot, 1969a, 1969b)。当然,自然火的频次直接取决于点火事件 (ignition events) 的发生,如雷电等,但在某一特定的雷电环境下,更大潜力的可燃物燃烧性能会增加火的统计概率和季节分布。

2 可燃物的燃烧

在野外,可燃物的燃烧代表基本的化学物质氧化过程。虽然人们对可燃物燃烧时进行的过程和燃烧方式等性质非常感兴趣,但对这些过程的数量方面还缺乏了解。近年来,对可燃物结构及化学成分与燃烧性能关系的研究逐渐增加。一般认为火是物理环境的一个组分,经过自然选择的可燃物结构和化学特性对火类型生态系统中的植物火适应性产生影响。本文讨论影响燃烧性的可燃物结构和化学成分,评论这些成分在火传播中作用。最后讨论火类型生态系统中优势植物的这些成分的适应意义。

在基本的燃烧过程中,碳水化合物与氧结合产生二氧化碳、水和热量。尽管这个基本的过程是一个简单的反应,但对木质可燃物来说,由于其化学结构不同,反应则极其复杂。目前对许多木质成分,尤其木质部的分子量和结构都了解甚少。但一般来说,碳、氢、氧的比例大致为 $C_6H_8O_4$ (Brown 和 Davis, 1973)。

木质可燃物的燃烧可划为三个过程 (Brow 和 Davis, 1973)。在预热或吸热阶段,可燃物吸收热量,提高温度至燃点。预热过程中的吸热导致分子分解成挥发性化合物。在这一阶段,低温下易挥发的化合物组成对燃烧性具有重要意义。随着温度的升高,燃烧过程包括两个放

热阶段之一。这些阶段中可燃物进行热解作用，释放热量和可燃的挥发物，放热反应的温度能自我维持，但较难测定，大部分证据表明阈值大约在 325°C 。继续释放热量，可燃气体燃烧产生火焰，即进入气态物质燃烧阶段，这样的火烧称为有焰燃烧。如果缺乏火焰，则可燃物必须在达到较高温度下才能开始自燃。当可燃气体烧尽，而残留的木炭被点燃时，形成无焰燃烧（glowing combustion）。当可燃物表面进行氧化反应时，一氧化碳作为中间产物也进行燃烧，并与氧结合放出热量。

与无焰阶段相比，有焰阶段释放热量因可燃物不同而有较大差异。一般来讲，无焰阶段释放的能量较多，但释放速率较慢（Brown 和 Davis，1973）。对于这两个阶段，可燃物的结构与化学成分在决定燃烧过程中起着极其重要的作用。

3 燃烧性的结构因素

目前还没有关于植物冠层结构或枯落物层特性与燃烧性关系的指标，但很多与燃烧性能紧密相关的结构特征可以被定量刻画，如可燃物量、排列密度、可燃物表面积与体积比等。这些特征对影响点燃概率、蔓延速度，甚至火强度具有重要意义。

① 可燃物量，可通过单位冠层面积的可燃物干重测得，提供能够燃烧的有效可燃物数量指标。在其它条件相同的情况下，火产生的热量是可燃物量的函数。但可燃物量在单独使用时，却不能较好地预测火行为。水分含量和化学成分及其它结构特性对决定热能释放量和速率都非常重要。

② 排列密度（partical dencity）（单位体积可燃物的重量）影响导热率及点燃时间，从而影响燃烧性。Fons（1964，1950）实验表明，随可燃物密度增大，火的蔓延速度下降。可燃物燃烧方式（即有火焰燃烧或自燃）也是排列密度的一个函数（Brown，1970a）。在针叶树中，木材密度随树种不同而差异较大，同种地理上分隔的种群之间差异较小，小径枝的密度相对稳定（Ryan 和 Pickford，1978；Brown，1974）。

③ 可燃物表面积与体积之比（ S/V ，一般用符号 σ 表示）是一个表明燃烧性及燃烧的重要参数，这是因为由辐射、传导和对流的热量都是表面积的函数。因此表面积与体积的比值越大，热量传递到可燃物内部的速率就越快，燃烧速度也就越快（Countryman 和 Philpot，1970）。这种效应源于可燃物温的直接变化和水分的间接变化（Fons，1950；King 和 Linton，1963）。实验室实验表明，火蔓延速度随 S/V 比值增加而线性增加，但点燃时间的变化却相反（Curry 和 Fons，1938；Fons，1946，1950；Rothermel 和 Anderson，1966）。

不同类型可燃物的 S/V 比值差别极大。很多火类型植物群落都有 S/V 比值较高的细小叶片，用此可比较确定潜在的结构燃烧性（表 1）。常绿针叶树种的 S/V 比值在 $54-99\text{cm}^2/\text{cm}^3$ 之间，而落叶松（Larix）的 S/V 比值高达 184。禾草是许多群落中具有较高可燃性的组分，其叶片 S/V 比值也较高，在 $189-380\text{cm}^2/\text{cm}^3$ 之间。禾草茎秆 S/V 比值可与针叶树叶相比（表 1）。常绿沙巴拉（Chaparral）灌木叶片 S/V 也可与常绿乔木叶片的 S/V 相比较。Alectoria jubata 是高密度云杉泰加林生态系统中分布的非常易燃的地衣，具有细碎的枝结构和极高的 S/V 比值（ $623\text{cm}^2/\text{cm}^3$ ）（Brown，1970b）。Montgomery 和 Cheo（1971）发现点燃至自燃所需时间与 S/V 比值的对数成反比，而与叶厚度成正比。

表 1 叶可燃物的 S/V 值, 禾草区分了叶和茎的各自比值

种 类		S/V (cm^2/cm^3)
松 针		
<i>Picea engelmannii</i>		54.2
<i>Pinus ponderosa</i>		57.6
<i>P. contorta</i>		64.7
<i>Pseudotsuga menziesii</i>		69.1
<i>Abies grandis</i>		72.9
<i>Pinus monticola</i>		90.5
<i>Tsuga heterophylla</i>		99.8
<i>Larix occidentali</i>		184.0
禾 草		
	茎	叶
<i>Calamagrostis rubescens</i>	240	51.8
<i>Festuca idahoensis</i>	190	68.6
<i>Agropyron spicatum</i>	271	44.6
<i>Taeniantherum asperum</i>	380	58.5
<i>Bromus tectorum</i>	189	75.8
<i>Bambusa multiplex</i>		363.2
常绿灌木		
<i>Rhus ovata</i>		71.7
<i>Heteromeles arbutifolia</i>		80.0
<i>Eriodictyon trichocalyx</i>		76.0
<i>Prunus ilicifolia</i>		133.2
<i>Rhamnus crocea</i>		127.0
<i>Rhus laurina</i>		126.0
<i>Quercus dumosa</i>		126.0
常绿乔木		
<i>Magnolia grandiflora</i>		84.7
<i>Eucalyptus globosus</i>		94.7
<i>Eucalyptus obliqua</i>		61.8
地 衣		
<i>Alecoria jubata</i>		632.4

④可燃物层的孔隙度 (porosity, 树冠体积与可燃物体积之比) 是另一个与火蔓延速度呈正相关的结构组分 (Rothermel 和 Anderson, 1966)。孔隙度增加使林冠层可燃物内既有较高的对流性热传导, 又有更快的氧气流通, 因此能强烈地影响火蔓延。大量研究表明, 燃烧速度随孔隙度增加而增大至某一阈值后便不再增加 (Curry 和 Fons, 1940; Gross, 1962; 等 Byran, 1964; Anderson 等, 1966)。如果孔隙度太大, 未燃烧的可燃物颗粒则不能吸收足够的热量来点燃, 这样火强度和蔓延速度在疏松和紧实两种极端孔隙状况下都很低。在疏松状况下, 由于可燃物颗粒之间缺乏足够的热传导和生物量, 使火强度和蔓延速度较低。在紧实状况下, 由于空气与可燃物比值较低, 热量难以穿透可燃物表层, 也导致同样的结果。有人描述了其它几种度量可燃物层孔隙度的指标 (Brown, 1970a): 燃物层中空隙体积与表面积

的比值 (λ), 可燃物排列间的平均距离和可燃物层的容重 (单位体积可燃物层的重量) 比等。测量容重只能粗略估计孔隙度, 因为它未考虑可燃物的比重, 但具有测量相对简易的优点。Brown (1970a) 研究表明, 黄松 (*Pinus ponderosa*) 枯落物层和 *Bromus tectorum* 植冠的三种孔隙度高度相关。

一个结构燃烧性无量纲综合指标, 即可燃物 S/V 比值 (σ) 对孔隙容积与表面积比值 (λ) 之比, 已被用于火行为模型之中 (Rothermel 和 Anderson, 1966)。排列物的大小和可燃物层孔隙度都能与 S/V 和 λ 结合, 然而过去对这一指标的研究只涉及到单个可燃物大小, 因此, 还需要更多不同可燃物及其加权指数的实验研究来估计这一综合指标。

表 2 可燃物结构特性比较

可燃物	S/V 值对可燃物量之比 (cm ² * c ^{m-3} /g * m ⁻²)					
类 型	死可燃物 (直径 cm)			活 叶	可燃物深	熄灭湿度
	<0.6	0.6—2.5	2.5—7.6	可燃物	cm	%
禾草优势类型						
矮禾草	115/165				30	12
下层木	98/447	4/224	1/112	49/112	30	15
高禾草	49/671				75	25
灌丛类型						
沙巴拉	66/1119	4/895	1/448	49/1119	180	20
灌木	66/224	4/112	49/448	60	20	
灌木—杂木	57/336	4/559	1/448		75	25
木材枯落物						
密实枯落物	66/336	4/224	1/559		6	30
硬木枯落物	2/652	4/92	1/34		6	25
木材和下木	66/671	4/448	1/1119	49/448	30	25
采伐残留物						
少	49/336	4/1007	1/1231		30	15
中	49/895	4/3132	1/3692		70	20
多	49/1566	4/5146	1/6265		90	25

由于草本和木本可燃物结构燃烧性的重要性, 美国 USDA 林业机构已经对可燃物结构取样给予了相当的重视, 并制定出倒伏木材调查标准技术 (Brown, 1970a, 1974; Brown 和 Roussopoulos, 1974)。Albini (1976b) 汇总了经过选择的一些可燃物的可比较的结构特性数据 (表 2)。

可燃物湿度对燃烧性的影响强烈依赖于与热传递有关的结构特性。湿度很大的叶片能显著地降低燃烧性 (Olson, 1960; Montgomery 和 Cheo, 1971; Countryman, 1974)。细碎叶片迅速改变水分含量的能力是重要的结构因素。这个特性能决定燃烧是否发生。这类可燃物水分含量的平衡状态可以用温度和相对湿度求得, 并可作为表明燃烧性能的重要指标。Fosberg 和 Schroeder (1971) 建立了预测细小活、死可燃物水分含量的模型。

不同松树种类的形态相似的针叶可燃物, 其水分含量达到平衡的时间因时滞生物学特性而异, 变化范围从 4 到 21 小时 (King 和 Linton, 1963; Simard, 1968; Van Wagner, 1969)。经过 1 年的风化后, 所有针叶水分含量达到平衡的速率大大加快, 这明显是结构及化

学成分改变的共同结果 (Anderson 等, 1978)。

4 燃烧性的化学因素

以前, 对野火行为及燃烧性的研究主要集中于对可燃物结构特性和水分关系上。结构和湿度因素对燃烧性至关重要, 但热解作用显然受可燃物的无机和有机成分影响。这些成分影响热解作用释放出的可燃气体的有效含热量, 并影响能否有足够能量来点燃可燃物的其它成分, 这个有效热含量只是燃烧放出热量的一部分, 另外, 化学成分的性质也决定了释放可燃气体的温度。

4.1 纤维及无机成分

典型的纤维可燃物, 如木材, 约由 42% 纤维素, 25% 半纤维素及 33% 的木质素等结构成分组成, 这三种成分的热分解特性在图 1 中阐明 (Philpot, 1970)。与纤维素和半纤维素相比, 酸性木质素的热学特性相对稳定, 在 400℃ 下只损失其干重的 30%。这种特性使得对木质素在有关火烧方面的研究不如碳水化合物重要。另外, 很多木质素的热解产物具有比碳水化合物更大的分子量和较差的挥发物 (Kitao 和 Watanabe, 1967)。纤维素直到超过 300℃ 时才失去稳定性, 这时开始进行迅速的热解作用, 半纤维素如木聚糖开始分解的温度比纤维素低, 尽管它们产生同样类型的挥发物 (Shafizadeh 等, 1969)。木质可燃物的纤维素和半纤维素成分比木质素成分更易产生可燃挥发性气体。

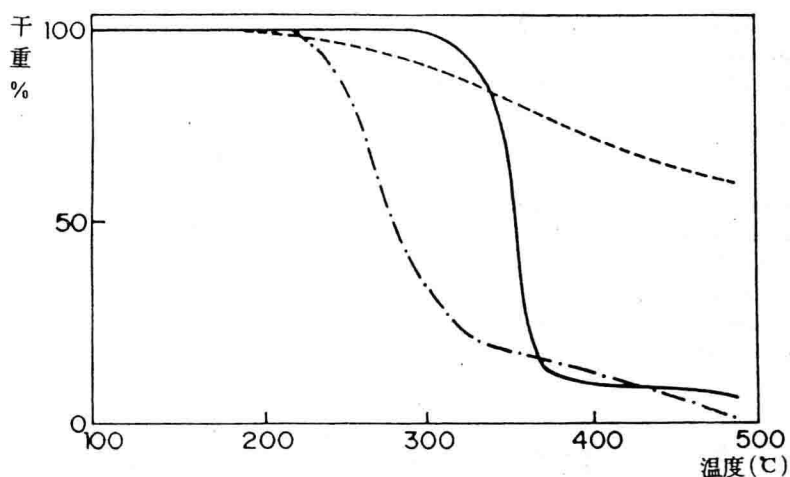


图 1 纤维素和半纤维素及酸性木质素的热分解特性

— 纤维素 — · — 半纤维素 — — 酸性木质素

Broido (1966) 表明, 当矿质元素含量低于 0.15% 时, 纯纤维素可燃物净热解反应发生强烈变化。添加 1.5% 二碳酸钾, 热解反应可以在较低的温度下开始进行, 但降低了最大反应速率和挥发数量。其它研究中也表明无机成分和热解及燃烧之间的类似关系 (Broido 和 Nelson, 1964; Tang 和 Neill, 1964; Waisel 和 Friedman, 1966)。Mutch 和 Philpot (1970) 认为

在联系可燃物矿质元素含量和热解及点燃上，硅含量应被扣除，他们建议在研究燃烧时使用无硅灰分含量指标。

Philpot (1970) 研究了野外可燃物的热解性质与无硅灰分含量的关系 (表 3)。当可燃物中无硅灰分含量低于 5.2% 时，热解性质改变最显著。灰分含量超过 12% 的四种喜盐种类中，热解作用的变化不成比例增加，因此认为高浓度的钠和钾，可能还有其它的阴离子成分，对热解作用的影响较小 (Philpot, 1970)。

表 3 植物矿物质含量与受热挥发性质 (Philpot, 1970)

植物种类	材料	无硅灰分 %	总灰分 %	挥发率 (%) 175—350℃	最大挥发率 (%) μg/℃	400℃时有机物 残留率 (%)
纤维素		0.01	0.01	94	232	5
Pseudotsuga						
menziesii	木材	0.11	0.11	71	84	26
Betula sp.	木材	0.18	0.18	79	84	19
Pinus ponderosa	木材	0.22	0.22	73	84	23
Populus sp.	木材	0.36	0.36	70	72	19
Bromus tectorum	叶	1.04	5.27	73	68	26
Taeniaterum	1.17	16.02	69	65	33	
asperum	叶	1.55	3.87	61	48	35
Pinus ponderosa	针叶	1.75	2.19	60	50	34
Adenostoma						
fasciculata	茎	2.54	3.34	59	44	38
Pinus monticola	针叶	3.33	3.63	55	48	38
Adenostoma						
fasciculata	叶	5.24	5.24	55	46	42
Populus						
tremuloides	叶	12.29	12.89	56	45	44
Atriplex						
canescens	叶	14.53	16.59	50	34	50
Tamarix aphylla	叶	14.83	15.39	58	47	47
Atriplex						
lentiformis						
var. brewveri	叶	18.63	19.26	57	48	48
Atriplex gardneri	叶	23.57	26.78	55	49	56

可燃物的磷含量经常与燃烧性能成反比关系。Philpot (1970) 发现野外可燃物的最大挥发速率与磷、钙含量之和高度相关。亚利桑那橡树 (Arizona oak) 灌丛叶中磷的含量与火蔓延速度有相关关系。在磷浓度低于某一阈值时，火蔓延速度一直增加 (Lindenmuth 和 Davis, 1973)。Countryman 与 Philpot (1970) 和 Rothermel (1976) 及 Granzow (1978) 都讨论了磷酸盐对燃烧性的重要作用。

无机盐类对纤维素类可燃物的影响效果还不太清楚，但其一般的反映是通过改变热解途径，而形成更多的木炭，但可燃挥发物则很少，因而总的燃烧强度减小。并且木炭的明火燃烧常被阻止，就更减少了热的产生 (Rothermel 和 Philopt, 1975)。这类无机盐所产生的效果是很多化学阻燃 (Fire retardants) 作用的基础，天然无机成分和人工阻燃剂都具有降低挥

发最大速率、增加木炭残留量以及在较低温度下引发热解的总体效果 (Philpot, 1970; Tang, 1967; Tang 和 Eickner, 1967)。对可能是当今应用最广的化学阻燃剂—多磷酸氨所做的大量实验表明其溶液的有效性与其活性磷数量有关, 活性磷可改变热解作用和燃烧反应 (George 等, 1977)。某些杂质如钙、镁和铁等在溶液中可与有效磷形成化合物而降低阻燃剂的有效性。

4.2 生物化学成分

在火研究中, 任何可燃物的两个基本性质是燃点温度和燃烧中释放出的有效能量。大多数火行为模型都将火强度反应作为燃烧热 (J/g) 和重量损失速率 (g/m^2 表面积) 的函数来计算, 并特别注意可燃物结构特性、湿度和矿质含量 (Rothermel, 1972)。然而, 这些模型都将从氧弹热力计测出的低热值假定为燃烧热, 因此无法区分可燃挥发物的有效热含量和木炭中的热含量 (Rothermel, 1976)。由于大部分植物组织的可燃挥发物是以高能的内含物、脂类、油类和蜡质形式存在, 因此尽管可燃物总的热含量变化不大, 但单个组织的燃烧性能差异很大。这些高能化合物对开始燃烧的性能影响极大, 因为它们普遍在相对低的温度下开始燃烧, 而不需要事先进行复杂的热解反应。它们常沉积在植物表面部分, 尤其是叶子上。某些可燃物极易燃烧, 是因其叶组织中具高浓度的高能化合物。一般, 具中等或高浓度乙醚提取物的活沙巴拉可燃物, 在水分含量达 100% 甚至更高时也能燃烧, 而死可燃物在湿度为 20—30% 时才能燃烧 (Rothermel, 1976)。经除草剂杀死的 *Sidum guajava* 叶子, 其燃烧不如自然死亡的叶子稳定。Philpot 和 Mutch (1968) 认为这种变化是由于除草剂的处理使乙醚提取物减少了 18%。Philpot (1969b) 发现 *Populus tremuloides* 叶子的最大燃烧速率与其提取物含量成比例。桉树叶子的精油 (萜类) 能通过增加燃烧初期热的释放而加强燃烧性能 (Pompe 和 Vines, 1966)。在相对不可燃的叶子中加入此类精油能显著增加热的释放速率 (King 和 Vines, 1969)。Philpot (1969a) 发现 *Adenostoma fasciculatum* 的含热总量与乙醚提取物含量有直接关系。Montgomery (1976) 亦发现地中海地区 16 种灌木的叶子燃烧性能与其已醚提取物含量相当紧密。点燃延迟时间与提取含量相反, 而火焰高度及亮度与提取物含量的对数直接相关。尽管可燃植物种类的乙醚提取物成分已被详尽描述, 植化实验的初步调查表明乙醚提取物包括大量的次生成分, 其中有甲基 (methylated flavonoids), 倍半萜、蜡三萜及酯化酚 (esterified phenolics)。对叶表进行浸洗的溶液中也发现有挥发性单萜、胺, 并可能有氢氰酸, 多数情况下这些叶外化合物都是低分子化合物 (75—300mW), 在高温下极易燃烧。象许多其它挥发物一样, 单萜和许多胺类燃烧后形成热力学不稳定的产物, 在纯氧中, 若被点燃, 它们极易燃烧。分子量小的化合物在燃烧之前只挥发而不分解, 不象纤维素和其它高分子化合物那样必须先分解 (Rothermel, 1976)。对于高分子材料, 只有在聚合物分解成分子量小的碎片时才能汽化和燃烧 (Granzow, 1978)。

在低温挥发物中, 乙醚提取物成分如萜类, 占了很大一部分, 很多极性较强的苯乙醇提取物在低于 300℃ 时即可挥发。这些提取物可能包括某些树脂、糖和其它易溶化合物。Shafizadeh 等人 (1977) 研究了乙醚及苯乙醇提取物对决定野外可燃物挥发的作用。在研究的六种植物中, 叶片中乙醚提取物含量在 1.9—16.8% 之间, 苯乙醇提取物含量在 11.2—32.8% 之间 (表 4)。*Ilex glabra* 提取物总量占其叶片干重的 44.6%。C 和 H 含量可表明热燃烧和燃烧性, 对这些样品的 C 和 H 分析表明乙醚提取物具有比苯乙醇提取物和非提取物更高的 C 和 H 含量 (表 4)。因此这些乙醚提取物在决定有效热含量和燃烧热总量方面具有重要作

用 (Susott 等 1975, Shafizadeh 等, 1977)。Shafizadeh 等人 (1977) 对六种植物叶片提取后样品和非提取样品的可燃挥发物热学分析表明: 温度在 100—500℃ 时, *Pseudotsuga menziesii*、*Ilex glabra*、*Pinus ponderosa*、*Populus tremuloides* 和 *Arctostaphylos patula* 中的大部分燃烧气体都是来自乙醚和苯乙醇提取物, 在这两种提取物中, 由于乙醚提取物挥发充分、燃烧热高, 因此虽然其含量低 (表 4), 但产生的可燃气体数量却占大部分。在 *Senecio repens* 中, 提取物总量较低为 13%, 多数可燃气体是由非提取物成分, 可能是纤维物质形成的 (Shafizadeh 等, 1977)。

表 4 6 种常绿植物叶提取物含量及碳氢含量

植物种类	乙醚提取物			苯乙醇提取物			非提取物		
	%	C%	H%	%	C%	H%	%	C%	H%
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	11.2	59.8	9.0	19.1	55.9	8.1	69.7	48.3	6.0
<i>Pinus ponderosa</i>	11.8	61.3	8.6	19.0	47.1	7.3	69.2	47.8	6.4
<i>Populus tremuloides</i>	16.8	73.3	11.8	19.8	47.4	6.8	63.4	44.3	5.8
<i>Ilex glabra</i>	11.8	76.5	11.4	32.8	50.8	6.4	55.4	49.4	6.7
<i>Arctostaphylos patula</i>	9.5	76.8	10.9	16.3	46.2	6.5	74.2	49.4	6.4
<i>Senecio repens</i>	1.9	70.4	10.4	11.2			86.9	48.3	5.8

对 *Pinus ponderosa* 和 *Arctostaphylos patula* 叶片的乙醚提取物和苯乙醇提取物的热学分析表明, 在 100℃—500℃ 时, 乙醚提取物几乎完全挥发 (Shafizadeh 等, 1977)。P. ponderosa 叶片乙醚提取物在一定温度范围内逐渐挥发, 在 270℃ 时有一个较低的峰, 而 *Arctostaphylos* 在低温下挥发较慢, 在 300℃ 时有一突起的波峰。苯乙醇提取物则很不一样, 在 200℃—300℃ 的低温下逐渐分解 (图 2)。乙醚提取物中含有的化合物, 由于其易挥发, 能量高, 因此在低温下开始燃烧和高温下增大火强度上具有重要作用, 纤维素在低于 300℃ 时不进行热解作用, 只在高温时才能燃烧。

可燃物中的乙醚提取物热含量远远超过其它成分。加利福尼亚地中海型硬叶灌木未被提取的叶片热值为 17000—22000j/g (Rundel, 1981)。Philpot (1969a) 发现 *Adenostoma fasciculatum* 叶子的乙醚提取物热含量高达 40000j/g, 茎乙醚提取物热含量高达 57000j/g (Susott 等, 1975; Rothermel, 1976)。预测可燃物的可燃挥发物燃烧的简单火模型的燃烧热数据一般是: 纤维素 16000j/g, 木质素 25000j/g, 乙醚提取物 32000j/g (Susott 等, 1975; Rothermel, 1976)。

有几项研究注意到可燃物乙醚提取物成分和能量的季节变化。Richards (1940) 发现了 *Ceanothus velutinus* 的提取物从六月 5.2% 到九月 11.5% 的加倍变化, 含能量也相应增加 20%。对克罗拉多山地的灌木, 包括 *Purshia tridentata*、*Cercocarpus betuloides* 和 *Artemisia tridentata* 的研究发现, 其提取物和含能量的季节变化具有相似的格局 (Pietz 等, 1962; Short 等, 1966)。从夏季中期至秋季, 当乙醚提取物含量为 61、42 和 6% 时, 其能值分别增加 9.0、1.0 和 3.5%。然而, 这种季节变动的生理作用还没有研究, 并且对这些植物乙醚提取物对燃烧性能的可能影响还只是猜测。

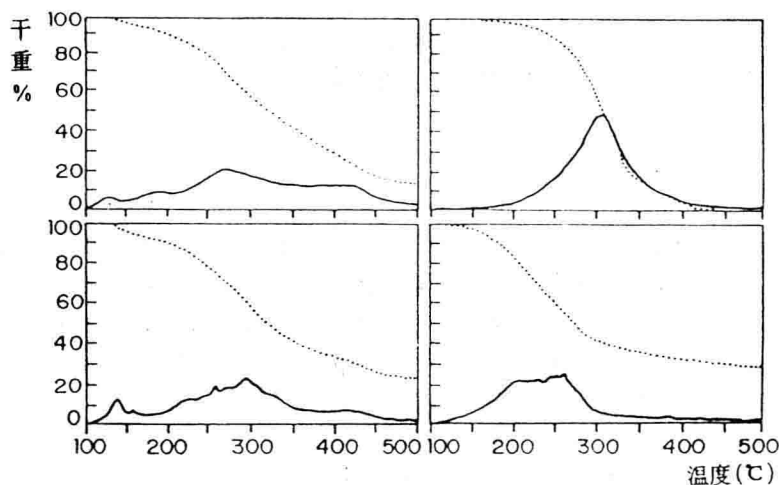


图2 乙醚和苯乙醇提取物热分解特性 (···总重量损失—某一温度下重量损失)
左图 *Pinus ponderosa*, 右图 *Arctostaphylos patula*; 上图乙醚, 下图苯乙醇

P. clausa 乙醚提取物的浓度在3月初达到12至14%的最高水平,这时针叶含水量最低。一年中,乙醚提取物变化的时间周期与燃烧面积之间紧密相关 (Hough, 1973)。

Philpot (1969a) 指出, *Adenostoma fasciculatum* 的乙醚提取物浓度也有显著的季节变化。叶中的含量从春季1.5%至秋季的12%,茎中含量则从4.3—8.9% (图3)。提取物含量在秋季增高,但与雷电火发生的频次相关不大 (图3)。Philpot 推测,春季提取物含量低是由于某些化合物被用来使茎伸长和使叶生长,而能值与提取物含量关系的变化说明组成提取物的成分也有明显的季节变化。

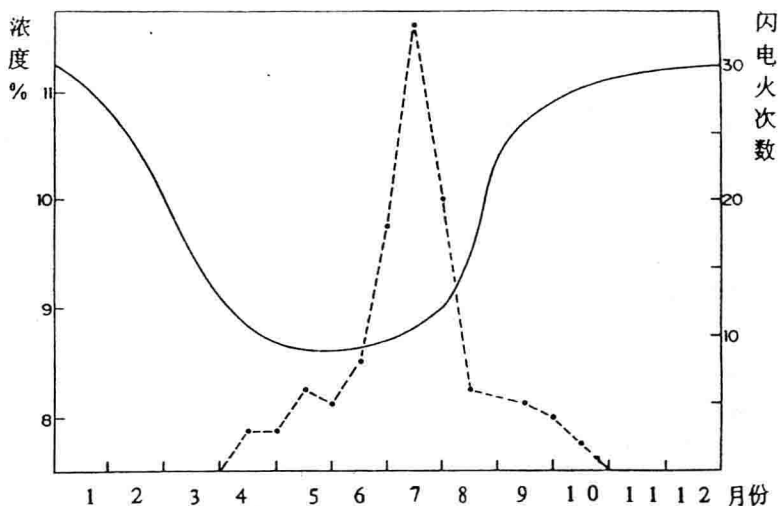


图3 *A. fasciculatum* 乙醚提取物浓度 (%) 年变化 (—) 与闪电火次数 (---)

Susott 等 (1975) 和 Rothermel (1976) 通过可燃物的纤维素、木质素、乙醚提取物和无机矿质成分相对比例,建立了简单的经验模型以预测可燃挥发物的燃烧热。这些模型与野外