

生物防火林带技术的科学基础和发展前景*

王海晖

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室,安徽合肥 230027)

摘要:生物防火林带技术是将特定常绿阔叶树种呈带状密植到易燃的植物群落中,用以预防和阻隔地表火及树冠火蔓延。研究表明,生物防火林带的阻隔火功能不只是来自于植物叶片间可燃性的差异,更多源于常绿阔叶树的树冠结构以及相对密植构成的独特林分。通过抑制带内地表可燃物的生长,实现对地表火的阻隔;在遭受树冠火袭击时,以其树冠较弱的可燃性和分层特性消灭火势(强度),降低火蔓延过程中热量运输的效率,使火蔓延自动终止。与传统的防火隔离带(生土带)相比,该项技术在阻挡火焰辐射、飞火以及保持水土和生态维护等方面拥有绝对优势。由于缺乏对其抵抗树冠火规模的量化认识,也没有建立起量化的技术性能指标以及细化的实施规范,生物防火林带技术仍处于经验型阶段。对该项技术的进一步发展与完善,不仅可以确保其在森林防火分隔实践中的应用效果,还可以在森林和城镇结合部等火灾多发地域发挥更大的作用。

关键词:森林防火;生物防火林带技术;阻火机理;量化技术指标;防火分隔

中图分类号:S762.3

文献标识码:A

Scientific Basis and Prospects of Biological Fire-prevention-belt Technique

WANG Hai-hui

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: Biological fire-prevention-belt technique is specific to the relatively dense plantation of evergreen broad-leaf species in highly – flammable coniferous communities in the form of a belt, for the purpose of preventing and blocking the spread of surface and crown fire. Research indicates that the functions of fire prevention and blockage not solely come from poor flammability of the plant leaves, but more importantly are originated from the individual crown structure of evergreen broad – leaf species and the stands formed as a result of relatively dense plantation. By inhibiting the growth of surface fuels in the belt, the surface fire can be isolated. During the attack of a crown fire, the fire intensity is lessened by the poor combustibility and layered feature of the plant crown. This rapidly reduces the efficiency of heat transfer during the fire spread, leading to the automatic termination of fire spread. Compared to the conventional fuel breaks, this technique has obvious advantages in the efficiency of blocking flame radiation and firebrands sourced from an external fire and in conserving local soil and water as well as maintaining the local ecology. So far, there is a lack of the understanding on its quantitative capacity in resisting the crown fire intensity, and no technical performance indexes and detailed implementation specifications have been established; thus, this technique remains at an empirical stage. Further development and improvement of this technique not only can ensure its effectiveness in the forest fire separation practice, but also make it available to maximize its utilization in other fire – prone areas such as the wildland and urban interface.

收稿日期:2014-12-25

基金项目:中国科学院“百人计划”择优支持专项。

作者简介:王海晖,博士,教授、博士生导师,从事生物防火林带、森林和城镇结合部火灾预防及控制技术研究方向研究;电话:(0551) 6360 0443,传真:(0551) 6360 1669;E-mail:HHWang4@ustc.edu.cn。

* 致谢:本项工作实施过程中现场考察和调研以及树样采集得到中国林学会森林防火专业委员会大力支持。

Key words: forest fire prevention; biological fire-prevention-belt technique; fire-blocking mechanism; technique performance index; fire separation

生物防火林带技术是将特定常绿阔叶树种呈带状密植易燃的针叶植物群落中,用以预防和阻隔地表火及树冠火的蔓延。林带宽度在 15 ~ 30 m 之间,栽种的树种被称为“防火树种”。作为一项融防火于绿化的技术,在我国森林防火工作中已得到广泛应用^[1-2]。

针对技术本身开展的工作主要集中在“防火树种”筛选上。依据树种间着火特性、热值等的差异筛选出的树种多为乡土化的常绿阔叶树种^[1-9]。关于防火林带阻隔火灾功能的认识主要来自于现场测试和在实际火灾场合中的观察结果。通常的观点是,防火树种可燃性差并且抗火性能佳,防火林带之所以能阻隔火是由于栽种了“防火树种”的缘故。由于认识过于笼统,相应应有对防火林带的阻隔火功能持怀疑态度的。其基本依据是,所有树种都是由类似的物质组成的,因而它们在本质上都是可燃的^[10]。

郑焕能等^[11]在 1995 年指出,生物防火林带的阻隔火能力来自于林分的阻燃特性,而林分的阻燃特性又来自于单株树的阻燃特性。单株树的阻燃特性与其树冠的形状、疏密程度和枝叶的状态以及林下调落物的可燃性密切相关,从而为揭示生物防火林带技术阻隔火效能的本质开辟了新思路。在后来国家林业局编辑出版的专著中更明确地提出^[1],生物防火林带的阻燃功能由林带内可燃物的结构、分布和状态决定的。只是,迄今为止没有对这项阻隔火技术具体工作机制形成足够的认识并建立起完整的科学理论体系。

为弘扬广大林业科技工作者在此技术上所付出的劳动和取得的成就,澄清该项技术中的核心问题,

笔者率领一个科研团队在多个省份对生物防火林带技术的发展现状和实施的效果进行了考察和调研,同时对技术的科学基础展开了进一步研究。在此,笔者将近几年开展的部分工作做概要性介绍,并对该项技术尚存的科技问题以及解决的必要性与迫切性进行了阐述,以期促进该项技术的发展与完善。

1 防火林带的阻燃机理

1.1 典型树种的物理、化学属性和热解特性

可燃物的基本组成可以由工业和元素分析来标定。对包括木荷 (*Schima superb* Gardn. et Champ.)、油茶 (*Camellia oleifera* Abel.) 和云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.) 在内 19 个针阔叶树种叶和枝工业分析结果表明^[10],树种间组成的差异主要表现在水分含量上(41.4% ~ 72.5%)和相应的挥发分含量上(46.5% ~ 20.2%);固定碳变化范围较小,在 3.5% 至 11.9% 之间,而灰分含量在很低的水平上变化(1.0% ~ 5.0%)。进一步分析表明^[12],样品水分含量与其挥发分含量呈高度负线性相关,并且挥发分含量与固定碳含量间存在一定比例关系。元素分析结果显示^[12-13],去除水分和灰分后样品间元素组成几乎不变,其中 C、H、O、N 的比例关系基本为 34.3:2.1:22.8:1.0, S 含量可以忽略。

典型树种叶片的厚度、密度和热物性参数测试结果见表 1。尽管树种间参数结果有一些出入,除个别树种的导热系数和比热结果外,基本变化幅度都不大。吸收率是表征材料吸收热辐射效率的参数,不同树种间的测试结果的差异几乎可以忽略。

表 1 典型树种叶样厚度、密度和热物性测试结果

树种名称	平均厚度/ mm	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	比热/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	正/反面 吸收率
台湾相思 (<i>Acacia confuse</i> Merr.)	0.23	1 010	0.812	0.449	0.56 / 0.56
细柄阿丁枫 (<i>Altingia gracilipes</i> Hemsl.)	0.25	690	1.176	0.405	0.50 / 0.44
红花油茶 (<i>Camellia chekiangoleosa</i> Hu)	0.30	1 060	0.993	0.194	0.53 / 0.49
油茶 (<i>Camellia oleifera</i> Abel.)	0.32	920	1.180	0.333	0.57 / 0.51
铁冬青 (<i>Ilex rotunda</i> Thunb.)	0.25	860	0.995	0.240	0.62 / 0.58
米老排 (<i>Mytilaria laosensis</i> Lec.)	0.30	820	1.197	0.313	0.54 / 0.52
木莲 (<i>Manglietia fordiana</i> (Hemsl.) Oliv.)	0.34	840	2.125	0.262	0.57 / 0.53
木荷 (<i>Schima superba</i> Gardn. et Champ.)	0.23	870	0.828	0.496	0.56 / 0.54

叶片的热解特性可以用热重分析仪测定。5个典型树种的热重(TG)和失重速率(DTG)曲线见图1a和b。可以看到,不同树种的叶样热重曲线具有高度相似性。热解过程呈现三个阶段变化:150℃之前质量下降最快,相应的DTG曲线高而陡;150~380℃为第二个失重阶段,失重速率中等,而对应的DTG曲线上出现多个失重峰,表明存在不同物质热解反应的叠加;380℃后质量变化较为平缓,DTG曲线则主要表现为一个较低的肩状峰^[13]。分析表明,随着温度的提升,树叶样品经历脱水、挥发油类物质析出、半纤维素、纤维素以及木质素的依次降解并形成焦炭(即固定碳)等过程^[13-14]。

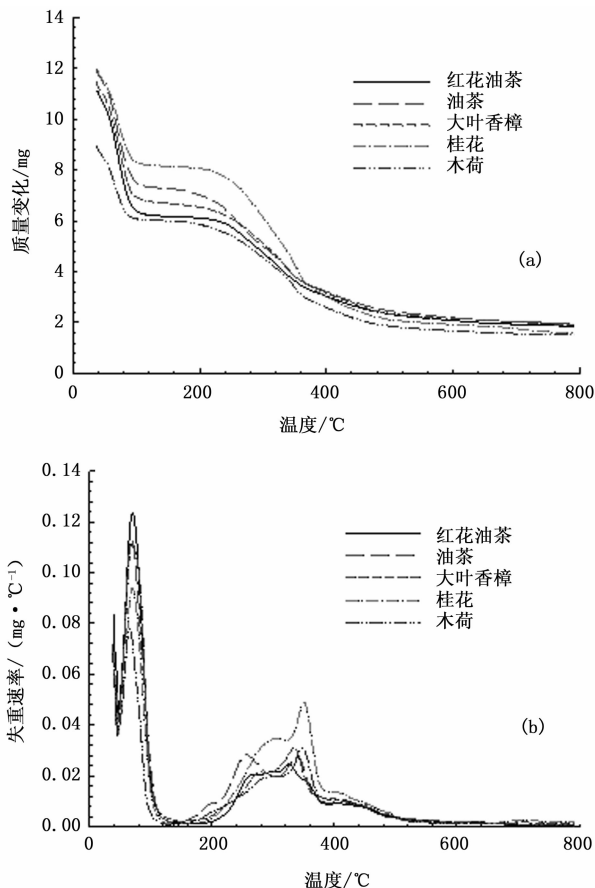


图1 典型树种叶样在高纯氮气氛围中以 $10\text{℃}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温速率获得的TG曲线(a)和DTG曲线(b)

采用多组分平行反应模型并结合非线性最小二乘拟合技术,对叶样热重(TG)实验结果进行动力学过程解析。解析结果表明^[13],树叶热解的气体产物主要来源于半纤维素和纤维素,它们的含量在很大程度上决定了工业分析中挥发分含量的高低;而固定碳含量是测定挥发分后残留的有机固体部分,对应于树叶热解过程中的成炭比率。半纤维素和纤维

素热解的气体产物基本为有机类小分子化合物,是气相火焰的主要燃料^[14]。树叶组成中半纤维素和纤维素含量越高,意味着测定出的挥发分含量高;相应地,树叶的热稳定性较差,可燃性较强。由于树叶中含量间的自守恒关系,随着水分含量的增加,相对含有半纤维素和纤维素的量变少,因而挥发分含量降低,树叶的热稳定性加强,可燃性相应减弱。

1.2 防火树种的可燃性分析

树叶的可燃性可以直接由标准化的锥形量热仪检测。典型树种叶样在特定热辐射强度下的表现见图2。在实验前数十秒内部分样品的热释放速率(HRR)出现陡升;最高可达 $80.5\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$,标志着着火现象的形成。到达峰值后,HRR迅速下降,然后维持在较低水平直至实验结束。这直接对应着气相燃烧现象结束后转变成样品的表面阴燃。其中,红花油茶、油茶和大叶香樟(*Cinnamomum septentrionale* Hand.-Mazz.) 3个样品的HRR则没有出现显著跳跃,而是在约100s后才开始出现缓慢的提升。这直接对应着另类着火模式,即着火只表现为阴燃燃烧^[15]。

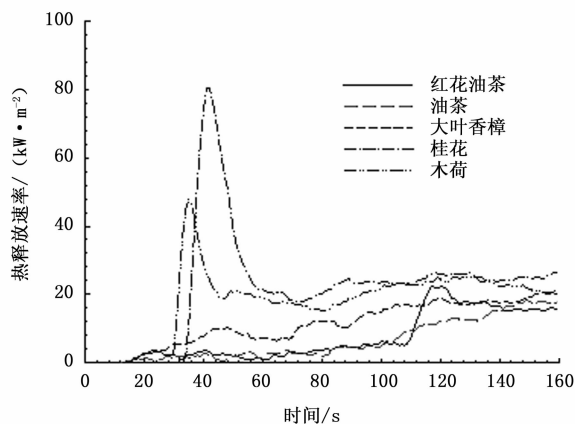


图2 辐射热流强度 $35\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 下五个树叶样品实验前160s HRR随时间变化

同等质量不同干燥度条件下红花油茶样品的测试结果见图3。结果表明,当样品的含水量大于49.1%时,没有出现气相火焰,只有阴燃燃烧;当含水量低于43.9%后,样品才出现明火燃烧现象。

比较图2和图3中的结果可以看到,实验过程中出现明火时间在20~100s之间,在火焰消失后通常只会出现阴燃燃烧;相应地,在热释放速率的曲线上表现为尖锐的峰形。这是与连续性强和均匀多孔燃料的结果迥然不同之处。其产生的根源是样品内部结构导致热量运输差异的结果(图4)^[15-16]。

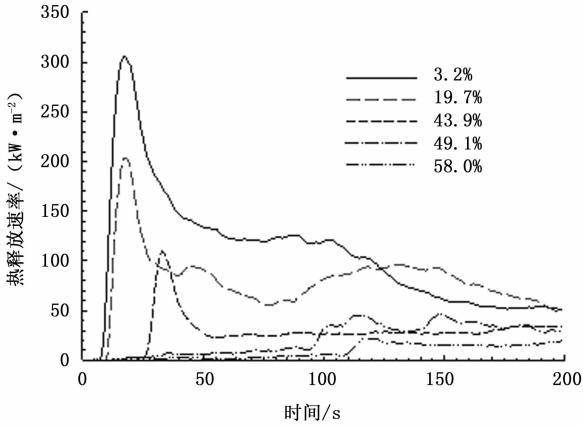
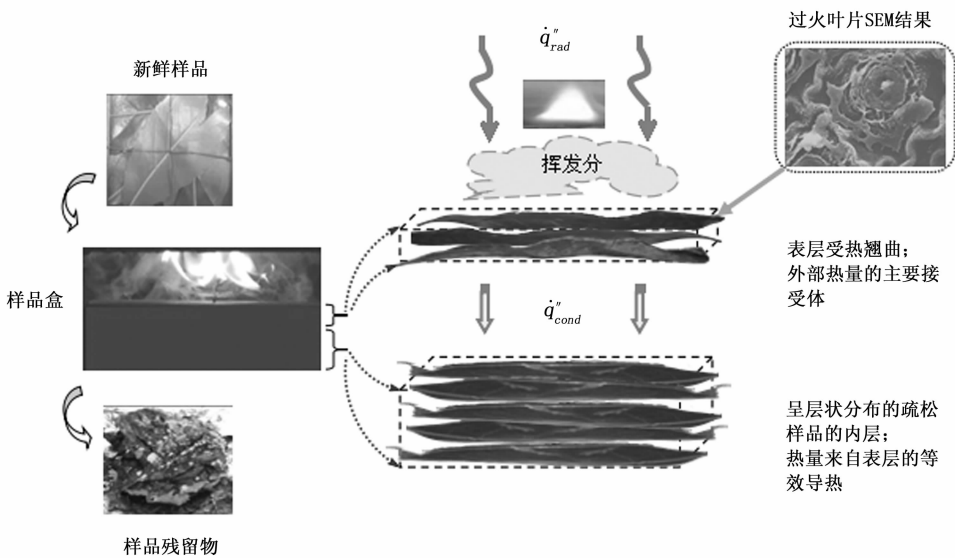


图3 辐射热流强度 $35 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$ 下不同含水量红花油茶叶样的 HRR 随时间变化

树叶样品具有分层特性,其直接接受外部辐射热流的部分构成天然表层。随着表层的温度提升,其吸

收的部分热量会通过热传导或层间空隙中的辐射换热传递给内层,从而导致内层的升温。由于样品的分层和多孔特性加上植物叶样自身的热物性的限制(见表1),其表层向内层热量运输的效率低,并且内层吸收的能量主要用于水分蒸发^[16]。在表层受热分解产生挥发分并转变成焦炭层时,其内层并没有能够升至足够高的温度以及及时向火焰区补充可燃性挥发分。相应地,热释放速率呈尖锐峰形。

可见,同等外部热流作用下,含水量的大小决定树叶样品是否出现明火燃烧。样品的分层和疏松特性以及热物性的综合作用导致样品的明火持续时间短。对于高含水量树叶样品来说,以其高保水性以及分层和疏松特性,严重制约其燃烧速率(火强度);相应火焰持续时间较短。这些认识基本反映了树冠在实际火灾场合中的表现。



这里的电镜 (SEM) 照片放大倍数为 2 000 倍。符号 q''_{rad} 表示外部净辐射热流,而 q''_{cond} 则代表样品表层向内层热量运输的等效导热^[15]

图4 样品分层结构和着火过程中的热量运输示意图

1.3 防火林带阻隔林火蔓延的作用方式

常绿阔叶林带林分特征使林带内可燃物的垂直分布以及其可燃性方面出现了重大改变(见图5)。由于阔叶树的郁闭效果,林下细小可燃物堆积量相对较少;相对密植和自然整枝现象导致树冠层离地面距离较高。针叶树则截然不同(图5),其树冠结构呈阶梯状向上发展,不但林下有大量的细小可燃物(即1小时时滞可燃物),在垂直方向上也存在较连续可燃物分布^[17]。

生物防火林带直接改变其火灾类型和强度。这种像撑起的雨伞状林带,带内可燃物的生长受到抑

制;地表可燃物的缺乏使得燃烧至带内的地表火自动熄灭^[17]。当树冠火来袭时才能构成真正意义上的火灾,但火灾的类型在最坏情形下为独立树冠火,即没有地表火支持的树冠本身的着火和燃烧^[18]。相对而言,针叶树林分中自地面起至树冠层在垂直方向上存在大量并近乎连续分布的可燃物,形成的火灾为立体树冠火^[18],火强度很高。

根据前面的实验结果可知,由于常绿阔叶树冠的保水性和疏松特性,可燃性较差,无法形成持续的高强度燃烧,加上叶片炭化所产生的遮挡作用以及林下气流的冷却效应,已燃区向未燃区的热量运输

效率明显较低(见图5)。火灾属自维持能量灾害,随着热量运输效率不断降低,蔓延机制被抑制,火蔓延速度迅速下降。由于燃烧强度与蔓延速度间的线性关系^[18-20],火蔓延速度的降低意味着燃烧强度的削弱,这会反过来进一步抑制火蔓延速度。当蔓延

速度低于特定值后,火蔓延即中止。这与火灾现场的现象是一致的。在许多火灾现场实地观察到^[1-2,17],木荷林带在遭受火灾侵袭时,其林缘几排会被烤焦并着火,但火焰无法深入林带内部,表明火灾被木荷林带成功阻挡。

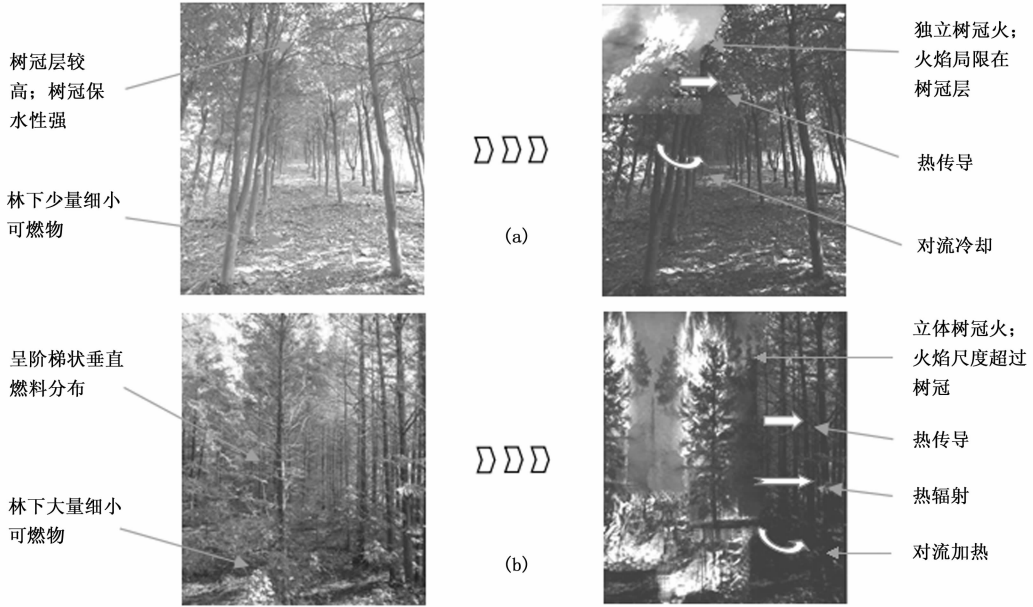


图5 防火林带林分(a)的燃料分布、形成树冠火的火势以及热量运输方式与针叶树林分(b)的比较

1.4 与传统防火隔离带比较

与全光式传统防火隔离带(生土带)相比,生物防火林带以其立体结构在阻隔火源向被保护林分的辐射能量运输以及飞火屑块的攻击上明显更为有效^[4,21]。这是为什么其建设宽度通常远小于传统防火隔离带的原因。

经过栽植和3~5年的抚育期,在适当清理林

下细小可燃物后,生物防火林带进入维持阶段,可以作为永久防火和隔火设施使用^[1]。传统的防火隔离带则不然,为维持隔离带的无燃料化,每年均得投入大量人工。与此同时,生物防火林带在保水土、维护生态环境和生物的多样性上更有优势。表2将生物防火林带与传统防火隔离带的优缺点做了详细对比。

表2 生物防火林带与传统防火隔离带的比较

类别	生物防火林带	传统防火隔离带
基本特点	将筛选出的常绿阔叶树以1 m×1 m或1 m×2 m株距相对密植成带状;树冠叶片浓郁;树冠层离地面有一定距离。	清理出带状无燃料区域,土壤裸露。
建设宽度	15~30 m。	50~200 m。
阻火机理	利用树冠层的郁闭效果,抑制地表植被的生长;保水性较强的树冠层可以吸收热源向被保护林分的热辐射,同时阻隔燃烧区形成的飞火;由于没有地表可燃物,林带边缘受外部林火侵袭后只会出现树叶炭化或局部过火,其蔓延也会因火势衰减而中断。	直接中断可燃物分布,加大热源与被袭植被的距离,以削弱热量传输的效率,由此阻隔火蔓延。
其它消防相关功能	紧急状态下的安全通道和救生的掩体。	紧急状态下的通道以及运输消防设备的道路。
环境和生态影响	有效利用土地;具有保水土、维持生态平衡以及促进生物多样性的功效;景观效果佳。	造成水土流失,破坏生态环境和生物多样性。
经费投入	初期建设费用投入较大;需3-5年抚育费用投入,成林后每年需进行林下可燃物清扫。	初始建设时开销较大;每年维护费用亦相当可观。

2 存在的问题

2.1 寒冷气候以及高海拔条件下防火树种的选择

防火林带技术实施主要依靠两个要素：“防火树种”的筛选和栽种技术。在我国的南方省份木荷等树种被广泛接受为主要“防火树种”，这是因为它们在造林特性（树冠幅度和浓郁程度、生长速度以及土壤适应性）、保水性（可燃性或抗火特性）、灾后再生能力（耐火性）和抗病虫害的能力上存在优势^[1]。笔者在黑龙江省小兴安岭地区和浙江省天目山考察时了解到，大部分适合南方温热气候条件下的防火树种，无法在天气严寒或海拔高度超过1 200 m地域生长。现有的文献资料表明，我国北方林区缺乏像南方省份普遍接受的防火树种，相关的研究也不全面。另外，对于生物防火林带建设远没有南方省份热衷。相对寒冷的气候条件严重制约着特定树种的生长速度是问题的关键。

极端条件下防火树种的选择应突破防火林带必须用常绿阔叶树种来抑制地表植被生长的框架，找到适宜在当地生长并对林火形成或发展成规模化火灾有一定抑制作用的树种以及相应栽植和管理方法。从这个角度来说，我国北方林区在这方面的工作是有基础的，比如将特定落叶松（*Larix gmelini* (Pupr.) Pupr.）林或蒙古栎（*Quercus mongolica* Fisch.）林修建成具有阻隔地表火效能的改培型生物防火林带等^[1,22-23]。只是有必要做进一步探索，以强化其阻燃效能并拓宽其阻隔火灾的类型（比如树冠火）。

2.2 林带生物学特性对阻隔火功能稳定性影响

作为一项绿色环保型阻隔火技术，其优势已在实践的检验中得到充分肯定。但也存在缺点。由于防火树种树冠叶片浓密、自然更替周期较短并且分解时间相对较长，在维护不够充分的林带内凋落物造成的堆积现象非常显著。近十年发表的文献中多次出现过类似报道^[1,24-27]。翁永发等^[27]在11年生木荷林带中测定出地表凋落物的载量达 $0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ，加上半分解层（腐殖层）的载量已超过 $1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ （去除水分后约 $0.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ）。对于如此载量下地表可燃物来说，在干燥天气无疑会成为火灾穿越林带的载体^[19,28]。另外，在有风情形下，过火林分内的燃烧屑块（即飞火）会飞入林带内点燃地表细小可燃物。引燃的落叶甚至会在风场作用下直接迁入附近被保护的林分内，由此点燃被保护林

分^[18]。浙江省开化县开化林场的扑火队员实地观察到，上山火的火头能快速穿过防火林带，部分原因可以归结为林带地表细小可燃物的燃烧所发挥的作用。

林带地表细小可燃物堆积现象是防火林带树种生物学特性决定的。它不但影响生物防火林带防火和隔火功能，还影响到其长期维护的成本。找到经济有效的解决办法或措施是当务之急。

2.3 建设周期控制及防火分隔网络建设原则

依照常规的建设方法，生物防火林带建设由幼苗种植起经抚育至郁闭成林和发挥功效，前后达数十年之久^[1]。相比其生命周期中使用效果的长期性（至少数十年），建设周期并不算长。采用移栽大龄幼树的方法营建生物防火林带能缩短建设周期，而且能更早使其具有阻隔火功能。这意味着单株树栽种成本的增加，但前期抚育时间会缩短，相应的抚育费用会下降。由此可见，生物防火林带建设周期的控制不仅是个技术问题，也是一个经济性问题。

目前在设计防火林带建设位置、宽度以及分布密度上缺乏科学计算方法。林地的潜在林火行为与该地域的植被种类、分布状态、面积大小、地形和地貌特点以及当地气象环境条件密切相关，对该地域进行防火分隔规划时必须考虑这些因素，以保证技术实施的有效性。由于防火林带建设和后期维护是动态过程，同时涉及大量的人工和经费投入，在建设防火林带并闭合成防火分隔网络时也得兼顾其有效性与经济性统一。

2.4 阻隔树冠火的强度

防火林带能防树冠火，但到底能防多高强度的树冠火，迄今为止，没有量化的结果以及具体的参数表征。很大程度上正是由于这个原因，本项技术目前仍停留在经验型阶段。

生物防火林带能防火和隔火，基本来自于经验观察^[1,4,17]。国家林业局森林防火办公室曾组织过多次野外火烧试验^[1]，但试验的规模小、持续时间短，加上没有对现场植物群落、地形、地貌、气象条件以及火行为参数的仔细测量，结论基本是定性的。在近二十年间，栽种的防火林带基本成功经受了火灾的考验，但因缺乏足够的现场观测数据，无法确定具有特定宽度和高度的林带到底能抵御多高强度树冠火等的量化关系式。

2.5 对大面积飞火的阻隔

大面积飞火主要表现为大量燃烧屑块的形成、

随风场向下游迁移以及被接触的细小未燃可燃物的点燃。因其形成的随机性、特殊的传播方式和宽广的作用区域,目前还没有完全有效的阻隔技术。生物防火林带只有在其高度远超过其附近植物群落并且足够宽时,对附近过火林分中产生的燃烧屑块才具有充分的阻挡和吸收作用。

考虑到飞火的有效作用区域通常是过火林分的燃烧强度和燃烧屑块迁移距离的函数^[18,29],相应可以从两个方面开展工作:一方面,通过对防火林带结构的改造并拓展其有效宽度,提高其抵御和吸收森林大火中密集燃烧屑块袭击的能力;另一方面,通过对附近易燃林分的间伐和林相改造,并辅以传统的防火隔离带建设,降低其形成森林火灾的强度和规模,从而间接抑制燃烧屑块的形成速率并预防其大面积出现和迁移的可能。这些措施均可以在很大程度上减小飞火现象的作用范围。浙江省天目山国家级自然保护区管理局的实践与上述工作思路是一致的(见图6)。



图6 位于浙江天目山坞子岭山脊线上的防火林带。建于80年代末,带宽约12 m。一侧留出15 m宽开阔地;另一侧则栽种具有一定保水性的红壳雷竹(*Phyllostachys incarnata* Wen),实现双重防火林带与传统防火隔离带的结合

3 结论和展望

直接从树种主要构成的可燃性角度去解释生物防火林带的阻燃机理会走向误区。生物防火林带的隔火功能更多来自常绿阔叶树的树冠结构和相应构成的独特林分:凭藉阔叶树郁闭效果,抑制地表可燃物的生长,从而实现地表火的阻隔;以其树冠较弱的可燃性和分层特性,逐步消灭火势实现阻隔树冠

火的功能。该项技术在阻挡火焰辐射、飞火现象的效率上以及保持水土和生态环境维护等方面远胜于传统防火隔离带(生土带)。

目前生物防火林带建设缺乏足够的量化技术表征。有必要进一步增进对生物防火林带抵抗树冠火规模的量化研究,并建立相应的技术性能指标。在此基础上确立生物防火林带的技术实施依据和原则,以保证防火林带建设中有效性与经济性的统一。

生物防火林带功能的多样性应得到发展。目前多个省份在生物防火林带功能的多样性上已取得进展,颇有成效。在对森林植被开展防火分隔的同时,将生物防火林带应用于森林和城镇结合部等火源丰富和火灾多发地域,可以降低结合部火灾发生频次和引发森林火灾的几率。可以肯定,在广大林业工作者的共同努力下,这项绿色环保型技术在走向成熟的同时,将得到更广泛的应用,从而为保护森林资源、生态环境以及居民的生命财产安全发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 国家林业局森林防火办公室. 中国生物防火林带建设[M]. 中国林业出版社,北京,2003.
- [2] 毕忠镇,郭惠如. 科学有效的森林防火工程—生物防火林带[C]. 2007中美灾害防御研讨会,北京,2007.
- [3] 陈存及,何宗明,陈东华,等. 37种针阔叶树种抗火性能及其综合评价的研究[J]. 林业科学,1995,31(2):135-143.
- [4] 舒立福,田晓瑞,李惠凯. 防火林带研究进展[J]. 林业科学,1999,35(4):80-85.
- [5] 田晓瑞,贺庆棠,舒立福. 利用锥形量热仪分析树种阻火性能[J]. 北京林业大学学报,2001,23(1):48-51.
- [6] 吴道圣,张新民,蒋明田. 生物防火适宜树种的综合评定[J]. 林业科技开发,2001,15(1):17-19.
- [7] 徐六一,罗宁,刘桂华,等. 安徽省防火树种的选择及评价研究[J]. 安徽农业大学学报,2005,32(3):349-353.
- [8] 刘桂华,张洁,余立华,等. 皖南19种树种生物防火能力的研究[J]. 安徽农业科学,2006,34(5):892-893,897.
- [9] 李世友,罗文彪,舒清态,等. 昆明地区25种木本植物的燃烧特性研究及防火树种筛选[J]. 浙江林学院学报,2009,26(3):351-357.
- [10] White R H, Zipperer W C. Testing and classification of individual plants for fire behaviour; plant selection for the wildland-urban interface[J]. International Journal of Wildland Fire, 2010, 19(2): 213-227.
- [11] 郑焕能,刘继红. 生物阻火层次分析法[M]//陈存及,杨长职,吴德友:生物防火研究. 东北林业大学出版社,哈尔滨,1995,45-48.
- [12] Wang H H, Zhu F. On the potential of woody plant species to form flaming combustion[R]. Unpublished Data, 2012.

- [13] 王 寅, 王海晖, 朱 凤, 等. 树叶组成的热解反应及其热稳定性的理论解析[J]. 林业科学, 2012, 48(11): 98 - 106.
- [14] Di Blasi C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(1): 47 - 90.
- [15] 王海晖, 朱 凤. 辐射热流作用下树叶样品的燃烧特征研究[J]. 火灾科学, 2013, 22(1): 1 - 9.
- [16] 陶骏骏, 王海晖, 朱 凤. 辐射点燃树叶样品过程中的能量分配[C]. 中国工程热物理学会 2014 年学术年会论文集, 西安, 2014.
- [17] 李振问. 木荷生物防火工程的应用效果研究[J]. 林业科学, 1997, 33(4): 338 - 348.
- [18] Pyne S J, Andrews P L, Laven R D. Introduction to Wildland Fire [M]. 2nd ed. Wiley, America, 1996.
- [19] Rothermel, R C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels [R]. USDA Forest Service Research Paper INT-115, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah, 1972.
- [20] Wang H H. Analytical model for determining thermal radiance of fire plumes with implication to wildland fire [J]. Combustion Science and Technology, 2009, 181(2): 245 - 263.
- [21] 吴德友, 刘爱荣, 姜绍满, 等. 南方林区防火林带体系建设 [M]// 陈存及, 杨长职, 吴德友: 生物防火研究. 东北林业大学出版社, 哈尔滨, 1995, 27 - 34.
- [22] 孙 岩, 李秋梅, 宁宝杰. 大兴安岭林区防火林带耐火树种的选择[J]. 林业科技, 2001, 26(3): 31 - 34, 30.
- [23] 刘广菊, 孙清芳, 李云红, 等. 改培型生物防火林带阻隔体系防火效果评价体系构建[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(4): 106 - 109.
- [24] 周宇峰. 木荷防火林带阻火机理的研究[D]. 浙江农林大学, 2007.
- [25] 徐高福, 余树全, 赵 洁, 等. 木荷防火林带群落及其不同立地生长特性研究[J]. 福建林业科技, 2009, 36(3): 88 - 91.
- [26] 刘世勤, 丰炳权, 汪建敏, 等. 千岛湖库区防火林带结构与组成及其优化选择[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2010, 34(5): 153 - 156.
- [27] 翁永发, 柴 雄, 戴慈荣, 等. 木荷生物防火林带与针叶林易燃物数量比较研究[J]. 浙江林业科技, 2010, 30(4): 62 - 65.
- [28] 王海晖, 王清安, 张人杰, 等. 森林地表燃料的载量对火蔓延速度的影响[C]. 全国高等学校工程热物理第四届学术会议论文集, 浙江大学出版社, 杭州, 1992.
- [29] Wang H H. Analysis on downwind distribution of firebrands sourced from a wildland fire [J]. Fire Technology, 2011, 47(2): 321 - 340.

更正启事

因编辑人员校对时疏忽, 2015 年第 4 期 529 页的表 7 出现了数据移位错误, 在此更正, 并向作者和读者表示歉意。正确的表 7 如下:

表 7 母树种子性状间相关和年度间相关

项目	种子宽度 - 2014	种子长度 - 2014	形状指数 - 2014	百粒质量 - 2013	种子宽度 - 2013	种子长度 - 2013	形状指数 - 2013
百粒质量 - 2014	0.916 3**	0.465 5*	-0.347 7	0.640 7**	0.635 7**	0.366 7	-0.306 9
种子宽度 - 2014		0.244 3	-0.601 4**	0.627 7**	0.699 2**	0.209 2	-0.538 3*
种子长度 - 2014			0.623 7**	0.309 0	0.102 6	0.691 9**	0.543 0
形状指数 - 2014				-0.244 5	-0.459 5*	0.397 9	0.871 7**
百粒质量 - 2013					0.917 2**	0.732 9**	-0.303 6
种子宽度 - 2013						0.501 0*	-0.584 7*
种子长度 - 2013							0.381 8
相关系数临界值	$\alpha = 0.05$ 时, $r = 0.404 4$; $\alpha = 0.01$ 时, $r = 0.515 1$						