



中南林业科技大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品，也不包含为获得中南林业科技大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式表明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：唐林强

2010年5月16日

中南林业科技大学

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件或电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权中南林业科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于：

- 1、保密□，在年解密后适用本授权书。
- 2、不保密□。

（请您在以上相应方框打“√”）

作者签名：唐林强

导师签名：邓永发

2010年5月16日

2010年5月16日

目 录

摘 要	I
Abstract	III
1 绪论	1
1.1 石漠化定义及其产生原因	2
1.1.1 石漠化定义	2
1.1.2 石漠化产生原因	2
1.2 森林的燃烧性	3
1.2.1 森林燃烧性的定义与内涵	3
1.2.2 森林可燃物的燃烧性	5
1.2.3 存在问题及展望	10
1.3 林火仿真研究进展	11
1.3.1 林火仿真定义	12
1.3.2 林火仿真研究方法 & 展望	12
1.4 研究的目的是意义	13
1.4.1 研究目的	13
1.4.2 研究意义	13
2 研究区概况、研究内容和研究方法	14
2.1 研究区概况	14
2.1.1 地形地貌	14
2.1.2 土壤	15
2.1.3 气候	15
2.1.4 水文	15
2.1.5 植被	15
2.2 研究内容	15
2.2.1 可燃物理化性质与林分的燃烧性	16
2.2.2 可燃物负荷量的研究	16
2.2.3 林火行为仿真	17
2.3 研究方法	17

2.3.1 林分及标准地调查 18

2.3.2 野外样品采集..... 18

2.3.3 可燃物负荷量的测定 19

2.3.4 可燃物热值的测定 20

2.3.5 可燃物含水率的测定 20

2.3.6 数据处理及分析 21

2.3.7 林分火行为仿真模拟 21

3 结果与分析22

3.1 可燃物理化性质与燃烧性 22

3.1.1 相对含水率与析水速率比较 22

3.1.2 有效可燃物的燃烧热值 31

3.2 不同植被恢复模式林分内可燃物负荷量 34

3.2.1 防火期内有效可燃物负荷量 34

3.2.2 非防火期内有效可燃物负荷量比较 35

3.3 不同植被恢复模式林分内可燃物能量现存量..... 37

3.3.1 防火期内有效可燃物能量现存量 37

3.3.2 非防火期内有效可燃物能量现存量 39

3.4 不同植被恢复模式林分林火行为仿真 41

3.4.1 地形因子在林火仿真中的应用 41

3.4.2 林分燃烧性林火行为仿真中的应用 42

3.4.3 林火仿真中的场景建模及三维火粒子模拟方法..... 42

4 结论和建议49

4.1 结论 49

4.2 建议和存在的问题..... 50

参考文献.....51

附录（攻读学位期间的主要学术成果）59

致 谢60

摘 要

由于石漠化对生态环境的极大破坏,因此石漠化地区植被恢复工作已倍受关注。而石漠化地区植被恢复初期地表易燃可燃物的大量积累,使得森林火灾形势极为严峻。一旦发生火灾,将导致植被破坏、土壤和养分流失,加速石漠化地区逆行演替的进程,使石漠化现状变得更加严峻。因此,森林防火工作在石漠化地区植被恢复工作中显得尤为重要。由于林分的燃烧性决定了森林防火工作的难易程度,从而影响石漠化地区植被恢复的成败。本研究在邵阳县石漠化植被恢复地区选择5种典型的植被恢复模式设置标准地,测定林分有效可燃物负荷量、可燃物的含水率、水分逸出速率、燃烧热值和能量现存量等,对湘西南石漠化地区5种植被恢复模式(湿地松纯林PEPF,侧柏纯林POPF,湿地松+枫香混交林PLMF,枫香+侧柏混交林LPMF,枫香纯林LFPF)早期林分燃烧性进行研究,并在此基础上对林火行为进行仿真模拟。取得了以下主要研究成果:

邵阳县石漠化生态系统早期植被恢复模式林分中,主要的有效可燃物种类为:白茅、马鞭草和一些灌木。同种林分在防火季节内与非防火季节内燃烧性的差异主要是由于这些有效可燃物的载量、含水率、热值和能量现存量等因子的差异所导致。

在湖南省高火险季节(秋冬季),5种植被恢复模式林分中的有效可燃物负荷量(EFL)都比较大,在 5.16 到 $9.89\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,其中,侧柏纯林最大,为 $9.89\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。有效可燃物(EF)的相对含水率为 $17.8\sim 42.6\%$,侧柏纯林中的白茅和凋落物的含水率小,水分逸出时间短,析水速率快,燃烧性较强。湿地松+枫香混交林中的EF平均相对含水率最大,水分逸出时间最长,燃烧性相对较差。主要EF的燃烧热值为 $11.7\sim 20.8\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$;同种EF在不同植被恢复模式中的燃烧热值没有显著差异;林分中EF燃烧热值的加权平均值相差很小,在 17.37 到 $18.03\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,不能作为林分燃烧性差异的判定因子。EF总能量现存量大小排序为:湿地松纯林>侧柏纯林>湿地松+枫香混交林>枫香+侧柏混交林>枫香纯林。

在低火险季节(植物生长季节),林分的EFL也都比较大,在 5.28 到 $10.42\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,其中最大的为湿地松纯林。EF的相对含水率较大,为 $15.5\%\sim$

71.2%。林分中EF燃烧热值在15.86到17.39kJ·g⁻¹之间。EF总能量现存量大小排序为：湿地松纯林>湿地松+枫香混交林>侧柏+枫香混交林>枫香纯林>侧柏纯林。不论是高火险季节还是低火险季节，湿地松纯林的乔木能量现存量都为最高，枫香纯林的乔木能量现存量最低，是最易燃烧的可燃物类型。

在林分燃烧性研究的基础上，借助已有的林火蔓延模型，对林火行为进行了仿真模拟，真实地反映了森林火灾发生后的现实状况。可用于森林火灾指挥与扑救工作。

这些林分EF燃烧特点表明，邵阳县石漠化地区5种植被恢复模式早期EF积累多，林分燃烧性较高；其中，纯林燃烧性大于混交林。因此，建议选择混交林进行石漠化生态系统植被恢复，并对部分植物进行适当强度清理，尤其是草本植物，以减少EF的积累，达到降低火灾风险的目的。

关键词：邵阳县；石漠化；有效可燃物；可燃物负荷量；燃烧热值；植被恢复

Abstract

Vegetation recovery is very important in rocky desertification area due to its destructiveness to the ecology system. Vegetation recovery is definitely very important for rocky desertification area. But there is more risk of fire disaster in the process of forest restoration because of the accumulating of fuels from vegetation. Fire will reduce vegetation, which leads to water, nutrition loss and soil erosion, and the aftermath is it will make the rocky desertification more sever and affect the burned area for a long period. The combustibility of forest is critical for the success of rocky desertification restoration.

The study sites were set in *ShaoYang* county. The level of effective fuel loading, the speed of water escape, gross caloric value, and effective fuel energy were measured and analysed in order to reaserch the combustibility of the 5 different vegetation restoration stands include *Pinus elliottii* Pure Forest (PEPF), *Platycladus orientalis* Pure Forest (POPF), *Pinus elliottii* and *Liquidamba formosana* Mixed Forest (PLMF), *Liquidamba formosana* and *Platycladus orientalis* Mixed Forest (LPMF), and *Liquidamba formosana* Pure Forest (LFPF). The result indicates that: the combustibility of the same forests in fireseason and non-fireseason is different. During the fireseason in HuNan province (winter and autumn), the main effective fuel are *Imperata cylindrical*, *Verbena officinalis* and some shrub; and the effective fuel loading of all the forests is higher, the number is between 5.16~ 9.89 t·hm⁻²; EFL of POPF is the highest among these, which is 9.89 t·hm⁻²; relative moisture content of effective fuel is between 17.8% and 42.6%; the relative moisture content of *Imperata cylindrical* and Forest Litter in POPF is the lowest, which has a strong combustibility because of the short time and high speed for water escaping; by contraries, the relative moisture content of effective fuel in PLMF is the highest, and the combustibility is weak. The caloric value of main effective fuel is between 11.7 kJ·g⁻¹ and 20.8 kJ·g⁻¹; it's almost the same among these forests; weighted average caloric value of effective fuel is low, which between 17.37

$\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ and $18.03 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$, can't be the judging factor of combustibility difference to the 5 different forests. The order of effective fuel energy is that: $\text{PEPF} > \text{POPF} > \text{PLMF} > \text{LPMF} > \text{LFPP}$.

The effective fuel loading of non-fireseason is also high, which ranges from $5.28 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ to $10.42 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$; and EFL of PEPF is the highest. The Relative moisture content of effective fuel is $15.5\% \sim 71.2\%$. The gross caloric value of the 5 forests is $15.86 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1} \sim 17.39 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$, the order of effective fuel energy is that: $\text{PEPF} > \text{PLMF} > \text{LPMF} > \text{LFPP} > \text{POPF}$. The effective fuel energy of arbor in PEPF is the highest in fireseason and non-fireseason, LFPP is the lowest.

Based on the combustibility of the forests, using analog simulation on the fire behavior of forests, by the forest fire spreading models reflects the real situation after the forest fire. It could be used in saving and conducting work of forest fire.

The features of effective fuel in these 5 forest demonstrates that: due to the accumulating of fuels from vegetation the combustibility of 5 different vegetation restoration stands is high, and pure forests are more combustile than mixed forests. So choosing mixed forests and reducing the grass for vegetation restoring is the best way to reduce the potential of fire happening, and suitable reduce of certain specises, especially the herbage, is also needed.

Key words: *ShaoYang* county; rocky desertification; effective fuel; fuel loading; gross caloric value; vegetation restoration

1 绪论

我国是森林火灾较为严重的国家之一，由于自然与历史的原因，森林火灾频频发生，火灾对森林资源和生态环境的破坏十分严重。林火不仅烧毁森林，降低林分密度，并且破坏森林结构，降低森林的利用价值^[1]。森林火灾作为火灾的一个重要的方面，从统计数据^[2-3]可以看出，每年发生的起数很多，并且一旦发生将会造成非常严重的损失，火灾对我国的森林资源和生态环境的破坏十分严重。林火发生是一个极其复杂的现象，它涉及的因素很多，有其自然属性，又有社会属性。自然属性中有可燃物的类型及其分布状况、地形地貌分布状况、气象因子等等。我国南方林区人工林多数是杉、松等针叶纯林，抗灾能力很弱，留下了严峻的森林火灾隐患^[4]。

森林可燃物是森林燃烧三要素之一，可燃物燃烧除了取决于火源和氧气必要条件外，还取决于本身的尺寸大小、结构状态、理化性质和数量分布。因此，森林可燃物是森林燃烧的物质基础，是林火行为的主体，是林火管理的基本依据。所以，对森林可燃物及其燃烧性进行定量研究，是现代林火管理中最重要、最基础的工作，它在林火发生预报、林火行为预报、灭火指挥、营林用火、生物防火等方面都具有重大的现实意义^[5-9]。实践证明，防火树种的选择可以有效地控制森林火灾的发生，同时，对各林分燃烧性的研究对森林火灾的预防有很重要的意义。

我国南方一些山区，由于多年来的一些不合理的人类活动，使得地表植被遭到严重破坏，水土流失形势严峻。在这些地区，沟壑纵横，地形破碎，生态失调。森林、草场植被破坏，导致土层减薄，涵养水源能力降低，水土保持在北方主要是保水，而在南方丘陵和山区不仅需要保水，更重要的是保土。石漠化使得植被破坏，物种减少，河道库坝淤堵，不仅恶化了农业生产条件和生态环境，还使广大群众失去赖以生存的基本条件，后果十分严重^[6]。而石山岩溶地区自然条件恶劣，造林绿化难度大，由于石漠化地区初期地表易燃可燃物大量积累，使得火险性更为严峻，一旦发生火灾，损失将无法预计，而且使得石漠化现状更加严峻，因此森林防火在石漠化地区更加显得重要。

和国外相比，我国的森林防火工作还有一定的差距，国内采用的主要手段往往还是针对遥感影像进行处理和分析，不利于我们从动态上形象地观测森林火灾的变化。而国外则结合了虚拟现实技术用三维方式模拟，便于直观观察分

析^[7]。在森林火灾方面,对森林火灾的蔓延、传播开发出相应的仿真系统,这对森林防火指挥扑救能起到很好的指导作用^[8]。

可以说:森林火灾是我国西南喀斯特地区石漠化植被恢复成败的关键因素之一,下面将从石漠化的状况与森林的燃烧性等几个方面来对石漠化生态系统植被恢复过程中的森林防火工作的研究进展进行综述:

1.1 石漠化定义及其产生原因

石漠化导致土地生态系统恶化,表现形式为土层变薄、基岩裸露、土壤有机质含量下降、质地恶化、植被量减少、土地生产力下降、作物单位面积产量降低等。因土层变薄、植被覆盖率下降,导致地表水源涵养能力降低,使井泉干涸、河溪径流减少,加剧了人畜的饮水困难。同时,地表储水能力的降低,还导致旱涝灾害频繁。其后果是导致经济效益、社会效益和生态效益综合指数下降,土地资源短缺和区域贫困,使石漠化地区的居民丧失生存条件,危及到全社会持续稳定发展^[9]。

1.1.1 石漠化定义

石漠化或称“石化”、“石山化”、“岩漠化”,是目前较被认同的名词,对其概念也有较一致的理解,但在内涵上却有不同认识,以区域和岩性来界定可分为广义石漠化和狭义石漠化^[10]。对于石漠化的定义,不同学者给予了不同的描述。最初较为普遍的表述是:由于喀斯特地区生态环境脆弱,森林植被的破坏,水土流失的加剧,导致了土地严重退化,形成基岩大面积裸露的现象称石质荒漠化(简称石漠化)^[11],且专指人为引起的侵蚀作用导致的具类似荒漠境况的退化土地^[12]。

1.1.2 石漠化产生原因

岩溶地区石灰岩特殊的地质结构是形成石漠化的内在因素。而人为因素的破坏则是形成石漠化的主要原因。强度石漠化对人类生存环境有很大的危害性,且其治理任务将更为艰巨^[13]。在石漠化土地中人为原因造成石漠化以过度樵采比重最大,占石漠化面积的48.5%;依次是不适当经营方式占24.9%;火烧占12.3%;毁林开垦占9.9%;其它占4.4%^[14]。石漠化过程中植被退化、

丧失是最为直观和敏感的现象。受人为活动或气候变化等影响,植被退化、植物群落受损,影响生态系统的稳定性,而稳定性变差的群落和系统更容易受损、退化,甚至丧失。研究表明,石漠化植被退化、丧失过程,首先表现在物种数量减少,其次是群落组成成分、结构趋向于单一化,以及生物量和植被盖度降低。地被物的丧失使其对流水侵蚀的抑制作用减弱甚至消失,从而为流水侵蚀、化学溶蚀等提供了有利条件。可以说,地表植被的退化与丧失是石漠化的先导过程^[15]。森林植被是自然界构成生态平衡的主体,它有调节气候、涵养水源、稳固边坡、减轻和防止水旱灾害、保持水土等的巨大功能和作用^[16]。因此,石漠化生态恢复的首要任务就是植被恢复^[17]。

1.2 森林的燃烧性

森林的燃烧性的研究是森林防火的基础工作,对石漠化地区的植被恢复工作起着关键的作用。

国外现在对燃烧性研究较多的是燃烧后所表现出的燃烧状态和燃烧速度,即火行为是热点,McRae 等通过航空红外线数字影像来分析监测火行为^[18],同时,国外更多的是直接进行点燃可燃物,以研究着火后,可燃物的火行为和火强度^[19],以及按照设定的火强度来测定着火后灌木和草本的萌生能力,森林可燃物作为森林燃烧的物质基础^[20],

国内燃烧性的研究主要集中在可燃物方面。我国对森林可燃物的研究开始于 20 世纪 80 年代中期,虽然研究较晚和较少,但水平较高,范围较广。主要从几个方面来进行研究,理化性质、可燃物负荷量、生物学和生态学特性、热分析、水分逸出率、燃烧性微观结构的研究。

1.2.1 森林燃烧性的定义与内涵

燃烧性取决于可燃物种类的易燃性,并与森林植被的特点及环境因子密切相关^[21]。燃烧,是一种化学现象,是可燃物在一定温度下与氧气进行氧化反应而放出光和热的现象。林分燃烧又称林火,是自然界燃烧现象的一种,它既有一般燃烧的基本特点,又有自己独特的规律,是影响林分的重要生态因子^[22]。森林燃烧性的研究离不开可燃物,因此要研究林分的燃烧性,首先就是研究林分内一切可燃物的燃烧性。森林地被可燃物种类主要包括乔木、灌木、草本、地被凋落物、苔藓及一切可以燃烧的森林附属物^[23]。

1.2.1.1 森林燃烧性

森林燃烧性是指森林被引燃着火的难易程度以及着火后所表现出的燃烧状态和燃烧速度的综合^[24]。森林燃烧包括两种类型：一种是非人为控制，在森林开放系统内，林火自由扩展蔓延，给森林和森林生态系统带来巨大损失的具有破坏性的燃烧。另一种则是森林可燃物在人为控制下，按照人们的意志去燃烧，如营林用火，按规定或计划火烧等，经常性火烧可以影响森林着火面积，防火有利于可燃物负荷量的增加，使可燃物面积具有连接性，会导致更大面积的森林火灾^[25]。森林燃烧具有三要素，即可燃物，氧气，和一定的温度，这三者联系在一起，构成了燃烧三角^[26]。国内在燃烧性方面的研究，在这三要素中，可燃物作为主要的研究对象，作为森林火灾的一个重要因子，它对火灾的爆发有着举足轻重的作用。

森林燃烧性作为森林火灾发生难易的指标，可分为三个等级，即易燃，可燃，难燃，这是对森林燃烧性简单，定性，相对的描述。森林燃烧性是指森林被引燃着火的难易程度以及着火后所表现出的燃烧状态和燃烧速度的综合。森林是一定地段上的各种可燃物种类的集合，一定地段上可燃物种类不同，构成比例不同，森林燃烧性也有明显的差异，因此树种的易燃性和树种构成是森林燃烧性的分量之一。可燃物作为燃烧的物质基础，通过研究不同生态系统中可燃物的属性，可以了解生态系统是如何决定林火的物质基础的，可燃物属性包括死地被物数量、含水率、个体大小、密实度、发热量等^[27]，相对于森林可燃物属性，这些属性也是必不可少的，因此对森林燃烧性的研究离不开森林可燃物。

1.2.1.2 森林可燃物

森林可燃物森林燃烧的物质基础，是指森林中一切可以燃烧的植物体，主要包括乔木、灌木、草本、地衣、苔藓、枯枝落叶以及地表以下的腐殖质和泥炭等森林可燃物的性质、大小、数量、分布和配置等，对森林火灾的发生、发展、控制和利用均有明显的影响^[5-10]。由于森林群落的复杂性，森林可燃物存在着地域性、区域性的差异，需要将可燃物进行分类和划分：

(1) 按物种类别分：分为死地被物、地衣、苔藓、草本植物、灌木、乔木、森林杂物等。死地被物主要由枯死的凋落物组成，如落叶、枯草、枯枝、死的苔藓、球果等。物种类别不同，燃烧特点差异很大^[28]。

(2) 按可燃物分布的空间位置划分: 分为地下、地表和空中可燃物。可燃物在森林中所处的位置不同, 发生森林火灾的种类也不同^[29]。

(3) 按生活力分: 将森林可燃物分为活可燃物和死可燃物两大类。死可燃物根据含水率的恢复时间又分为 1h、10h、100h、1000h 时滞的可燃物^[30]。

可燃物的燃烧性质是由可燃物的物理性质和化学性质决定的。森林可燃物理化性质包括内特性和外特性两部分。可燃物内特性是指描述可燃物植物部分的特性, 包括可燃物的化学性质以及密度, 燃点, 热值等物理性质; 可燃物外特性指描述可燃物组合的各种特性, 包括可燃物的数量, 大小, 形状, 含水率, 密实度及连续性等。可燃物内特性主要用来解释燃烧现象, 而可燃物外特性主要影响火行为^[31]。一个可燃物类型是一个可识别的, 在特点及空间分布上具有足够共同性的可燃物复合体。可燃物类型综合表现了植被类型所处的生境的研究条件, 及适应于环境形成的林分结构特征, 决定了可燃物的配置结构、密度、物理化学性质等。可燃物类型的特征包括载量、颗粒大小、密实度、容量或容积密度、水平连续性、垂直分布、水分含量、化学成分等^[32]。

综上所述, 森林可燃物包括了林地上所有有机物质, 若具体到某一可燃物内部, 可以发现可燃物的组成非常丰富, 包括了空间位置、大小、形状、数量、化学组成、水分含量等特征都有差别的一系列有机物。在森林燃烧性方面, 比较一致的认为可燃物是燃烧的物质基础, 其理化性质和生物学、生态学特性影响着可燃物的燃烧。凋落物、草本层、灌木层在森林火灾的形成中起到由地表火向树冠火传递蔓延的媒介作用, 是引起火灾的最基础物质, 它的性质、大小、数量、分布和配置等对林火的发生、发展、控制及利用均有明显的影响^[33]。因此对森林可燃物的研究, 包括对树种的种类分布, 森林可燃物组成的调查, 对森林火灾的发生与控制具有最基本的指导作用。

1.2.2 森林可燃物的燃烧性

由于森林可燃物与森林防火的密切相关性, 决定了对森林可燃物研究的历史悠久, 内容丰富。从国内外研究资料分析, 可分为以下几个方面: 可燃物理化性质, 可燃物分布与配置, 可燃物类型的划分和可燃物模型的研制^[5:9]。由于可燃物的理化特性包括内特性和外特性, 可燃物的内特性包括可燃物化学、密度、燃点、热值等, 主要解释燃烧现象, 外特性包括可燃物的数量、大小、形状、含水率、密实度及连续性等, 主要影响火行为。因此可燃物的内特性与

外特性共同影响森林火灾的强度,以及蔓延速率等特性。

关于可燃物的燃烧性,国外对于可燃物的理化性质有较为详细的研究,早在20世纪60年代末,美国就进行了可燃物负荷量模型的研究^[34]。Carmen测了几种主要木材的热值^[35];1961年Golley测定了从热带雨林至极地泰加林主要植物群落中优势种类的平均热值;1978年Luke估计澳大利亚多数可燃物热值可用20000kJ/g作为平均数在实际中应用^[36];1983年Chandle认为阔叶林冠层叶和灌木层叶含水率随季节变化很大,在春季新萌发的叶中含水率可达200%~300%,而在以后的季节逐渐降低。针叶树叶的含水率随季节变化不明显,如果低于100%,则有发生树冠火的可能性^[37]。同时,国外在助燃气体氧气方面也有研究,氮气是惰性气体,氮气含量较高,氧气含量减少,可燃物会表现出较弱的燃烧性能。A.M.Grishin和A.N.Golovanov在林分内注入惰性气体氮气来测定林分的燃烧性,通过注入不同浓度氮气对燃烧性的影响(来测定林分的燃烧性强弱,并得出使林分燃烧性最弱的最适氮气浓度。持续多样化的给易燃区放入惰性气体,也会使易燃区的温度降低,森林易燃性逐渐消失^[38-40]。

在国内,1983年郑焕能,杜秀文等,对红松、樟子松、落叶松3种针叶林上层死地被可燃物的燃烧性能进行了测定;1993年刘自强等对大兴安岭地区多种森林可燃物的含水率,燃点和灰分进行测定,并对其易燃性和燃烧性进行了评价^[41];1995年陈存及等对福建37个针阔树种鲜叶含水率、粗脂肪、粗灰分、SiO₂、挥发油含量和燃烧热、燃点、燃烧速度等10个因子进行测定,并应用A.I.D.方法将37个树种依因子的不同取值范围划分为6个抗火性能等级^[42];1999年谢玉敏等通过对7个不同树种:云南松,黑荆树,圣诞树,润楠,女贞,石楠和朴树的绝干含水率,石油醚抽提物和灰分含量的测定而得出结论:云南松的燃烧性最强,朴树的燃烧性次之,树种的燃烧性随季节不同而有差异^[43];2006年王月,高国平等对辽宁西北部地区的森林地被可燃物的燃烧性进行了研究,得出油松林型的地被可燃物具有明显的燃烧性,是最易引起火灾的危险林型,而该地区的一些阔叶树林型的如沙棘、天然杂木林、天然栎树疏林等和樟子松林型的燃烧性相近,同样也是比较危险的林型;2008年胡海清,鞠琳对小兴安岭8个阔叶树种的燃烧性能进行了研究,认为白桦阻燃能力最差,而青楷槭最强,因而青楷槭可以作为阻燃优先筛选树种。其他树种介于白桦和青楷槭之间。另外,蒙古栎树皮具有较强的抗火能力,但枯落叶极易燃,因而可以认为是

耐火树种^[44]。

1.2.2.1 森林可燃物的热值与燃烧性关系

自Long于20世纪30年代首先较系统地开展了植物热值研究以来,对生态系统中各种物质的热值及其变化机制的研究日趋广泛。1969年, Golley对热带雨林植物群落的能量进行了更深入研究。Golley的工作促进了对生物个体、种群和群落能量测定的普遍展开,不同类型生态系统及其组份的能量含量被不同作者报道。国外学者的研究主要集中在20世纪60~70年代,之后只有少量相关文献发表。对包括农田,高山冻原,草地,热带雨林,林地和湿地等生态系统的植物热值进行了广泛研究。我国学者关于植物热值的研究始于20世纪80年代,至今仍有许多相关文献发表。人们对各种类型的生态系统及其组分的热值及其变异性进行了广泛研究,包括草地,高寒草原,森林,农田,竹林,水生植物,红树植物等^[45]。

国外在理化性质与燃烧性关系方面最近几年研究比较少,但在可燃物的理化性质,化学组成对其燃烧的影响方面曾做了大量的研究工作。并从中得出^[46],可燃物的热值影响着着火温度和蔓延速度,热值越大,火强度越大,一些研究者以上述结论为依据,针对可燃物的某些理化性质、化学组成对可燃物的燃烧性进行了比较^[47],1998年于海峰等通过热值,含水率,二氧化硅含量,灰分率,油脂含量的测定,运用最小距离法,进行抗火性划分,又结合树种生物学特性:树冠结构,树皮厚度,密度,萌生更新能力对树种抗火性强弱进行排序^[48];刘桂华^[49]等研究认为含水率、热值等为树种抗火性能的主要分析因子;舒立福认为可燃物的热值影响着着火温度和蔓延速度^[50];热量一直以来被认为对燃烧性影响很大,热量释放是燃烧进行的一个重要环节,释放的热量使可燃物温度升高(Byram, 2004),增强可燃物燃烧性,所以对热量与燃烧性关系的研究成为燃烧性评价的重要方法^[51]。

植物干质量热值(Gross caloric value, 简称GCV)是指1g植物干物质在恒容条件下完全燃烧后所释放出的热量值,它较有机物重量更直接地反映了绿色植物通过光合作用固定太阳辐射能的能力^[52]。在大量文献中,热值的表示方法有多种,例如,热值也可表示为生物物质的能量浓度(Energy concentrations)^[53],能值(Energy value)^[54],热当量(Caloric equivalents)^[55],热含量(Caloric content)^[56],热能(Caloric energy),能量含量(Energy content)^[57]等。

植物热值也是评价植物营养成分及木材的燃烧性能的指标之一^[58]。氧弹式热量计法是测定热值的基本方法。

1.2.2.2 森林可燃物的含水率与燃烧性关系

除热值以外,可燃物含水率的大小,特别是细小可燃物含水率的大小,也决定了森林燃烧的难易程度^[59:159]。森林可燃物失水的快慢,直接影响着火点的难易程度,间接影响火强度、火势、林火蔓延速度等^[60]。

纵观各国研究和应用现状,尤其是美国、加拿大,其森林火险预报的出发点都是研究可燃物含水率。在美国、加拿大的森林火险预报系统中,它们是通过人工每天到林内测定可燃物含水率,然后上报、汇总、计算出全国或区域性的森林火险等级。70年代初, Forsberg以扩散方程Fourier Number为根据,提出一系列可燃物湿度模型,成为1978年美国国家火险等级系统含水量组分的理论核心;随后,其它研究人员确定了降雨、降雪以及气候对含水量影响的定量反应模型^[61,62,63]。加拿大火险天气指标系统(FWI)中应用的3个湿度码(包括细小可燃物湿度码、枯落物下层湿度码和干旱码)即3个可燃物含水率模型,反映了3种不同变干速度的可燃物的含水率^[64]。

由于我国幅员辽阔、森林可燃物类型较复杂,作为全国性的森林火险预测预报系统的业务运行,不可能采用美、加的方法来获得全国各地不同种类的森林可燃物的含水率,因此可以每天实时地通过因特网从国家设定的地面基准气象站获得气象观测数据^[59:159], 1997年张景群等认为鲜枝可燃物在高温作用下的水分逸出率与作用时间的关系,可用logistic方程表示,而且其相关关系非常明显,不同树种的鲜样可燃物不仅含水率有差,而且在干燥时的水分逸出率也有差别,这一关系可以作为防火树种选择的一个重要指标,并且通过定量分析得出,随着温度升高,水分逸出率急骤增加,枝径大小对水分逸出率有很大影响,可以作为区分易燃物和难燃物的依据;舒立福、张小罗等从可燃物特征、可燃物含水量、降水、雷电活动、连旱天数、空气温度、湿度和风等因子综述了它们对于林火的影响。王得祥等人研究了细小可燃物含水率与气象因子之间的关系、可燃物含水率与林火行为的关系、木本植物燃烧过程热能平衡等方面^[65,66,67],并且用不同林分地被物为研究对象,通过对其在不同含水率条件下着火与蔓延指标的测定及其强度指标的计算,揭示与含水率间的关系,确定出林火蔓延的临界含水^[68]。他们还在林分结构与易燃物分布、潜在火险性的关系

方面作了一些研究。

在活性可燃物中,可燃物含水率大小与燃烧密切相关。活性可燃物含水率是指植物体内的水分含量,以占植物干重的百分比来表示^[69]。森林中的可燃物分为死可燃物和活可燃物。活可燃物有草本灌木和乔木。死可燃物有枝条落叶、枯死杂草、腐殖质、倒木等。活可燃物含水率是预测林火发生林火行为、能量释放、估计火险大小的主要指标,是确定计划火烧实施营林用火的依据。死可燃物的含水率是现在和过去天气事件累积效应的一种综合产物^[70-74]。而且森林可燃物含水率或可燃物湿度,直接影响着火的难易程度,间接影响火强度、火势、林火蔓延速率、有效辐射。湿度还有冷却效应,促进烟的形成和减少热量产生的作用。是制订计划火烧、实施营林用火的基本依据。所以,开展对可燃物含水率的准确测定工作对提高林火发生、林火蔓延及林火行为预报的准确度具有重要意义。一旦发生火灾,还可根据湿度预测火蔓延情况,甚至预测火场大小等,计算应投入的扑火力量,提高扑火组织的工作效率等。含水量对可燃物热学性质的影响有很多方面。首先,含水量增加;延长了预热时间,使大量热能用以增加水分子的动能,使水分子从体内向表面扩散,达到表面后,脱附逸向空气中。其次,逸出的水汽在火烧环境中被加热到燃烧温度,消耗大量热能,这种热损失,降低了热值^[75]。因此可燃物的含水率是判断林火能否发生,进行林火发生预报的重要因子。可燃物含水率的大小还决定林火蔓延速度,能量释放大小和扑火难度。因此可燃物含水率也是林火行为预报的重要因子^[76]。

1.2.2.3 森林可燃物的负荷量与燃烧性关系

凋落物、草本层、灌木层在森林火灾的形成中起到由地表火向树冠火传递蔓延的媒介作用,是引起火灾的最基础物质。它的性质、大小、数量、分布和配置等对林火的发生、发展、控制及利用均有明显的影响。因此研究不同森林类型地表可燃物的负荷量,对于森林防火的研究有非常重要意义^[33]。负荷量即生物量,可燃物生物量是估测潜在能量释放大小的参数^[77]。早在六十年代末,美国就进行了可燃物负荷量模型研究,1973年Rothermel和Fhipot提出了可燃物动态模型的概念,使可燃物负荷量具有了时间变化的规律性。

我国张明军进行了南方松杉林分可燃物类型的动态系统划分的研究;邸学颖等研究了大兴安岭森林地表可燃物生物量与林分因子的关系,建立了1h、

10h、和100h时滞的地表可燃物数量的数学模型；刘晓东等用回归分析方法建立了兴安落叶松林的易燃可燃物负荷量、总可燃物负荷量模型^[78]；2000年，袁春明等选择林分年龄、密度、直径、树高几个林分因子，建立了低山丘陵区马尾松人工林幼龄林及中龄林可燃物类型的可燃物负荷量模型^[79]；2002年，邓湘雯等用逐步回归法选取易测的林分因子为建模单元，通过多模型选优，确定了南方杉木人工林的树叶、小于0.6cm的树枝、枯枝叶、大于0.6cm的树枝和树干的可燃物负荷量预测模型，编制了5个组分的二元可燃物负荷量表，提出了杉木人工林各种类型可燃物负荷量的预测方法和数学模型^[80]。2005年，张思玉等通过对林下可燃物的分布，潜在能量（可燃物负荷量），潜在能量消耗量等几个方面进行分析研究，结合不同林型的比较，得出最易燃的林型，结合地形进行防火措施的制定^[81]。

1.2.3 存在问题及展望

众所周知，森林火灾是森林的大敌，是森林的主要灾害之一。由于森林火灾对森林资源和生态环境的破坏十分严重，联合国已将大面积森林火灾列为人类社会的八大自然灾害之列^[82]。

1.2.3.1 森林燃烧性研究存在的问题

通过可燃物负荷量与能量的定量方法分析评价森林燃烧性，通过森林可燃物的负荷量等因子对林分燃烧性进行分类研究，通过研究可燃物的热值及含水率，对主要森林可燃物的燃烧性进行测定，对细小可燃物的易燃性进行测定，这些对森林燃烧性方面的研究范围非常广泛。

在森林燃烧性方面，国内主要以森林可燃物为主要研究对象，燃烧性的研究中各燃烧分量在逐渐扩大，选取森林内树种的组成，郁闭度，林分年龄，森林类型，坡向，坡度，海拔高度等林分地形因子作为燃烧分量，研究对象包括乔木、灌木、草本、地衣、苔藓、枯枝落叶以及地表以下的腐殖质和泥炭，更细的分到树根，树叶，树皮，树枝等，研究内容越来越细化；在研究内容上，由含水率，热值，燃点等因子逐渐增多，有的可达到10个左右的因子；对研究结果的处理方法上也在多样化，层次分析法，方差分析法，数量化分类法，聚类分析法，因子分析法等都在使用，这是对森林燃烧性研究上的一个新的突破，有利于找出更适合，更科学的研究分析方法。

近年来我国森林火灾统计数据显示,森林火灾造成的损失相当严重^[83]。并且林火的发生是一个复杂的过程,既有一般燃烧的基本特点,又有自己独特的规律,森林火灾的发生受火环境、天气条件、立地条件、林内小气候和氧气等火源、自然火、人为火以及不同类型可燃物自身的性质影响,其中可燃物是重要因素之一。因此,在可燃物理化性质研究基础上,结合生物学特性和生态学特点,可燃物负荷量,热值,含水率,环境因子,气候条件等,对森林的燃烧性进行综合完整的评价,是燃烧性评定的重要指标,对于这些指标的结合研究,是研究决定森林燃烧性的一个综合的方向。

1.2.3.2 森林燃烧性的研究展望

传统森林防火手段面临着许多无法解决的问题,无力控制大火和特大火,现有的机械型和单纯技术型防火措施解决不了火灾的随机性和突发性问题^[84]。但是,从已有的一些实例来看,随着防火技术的加强和提高,人们对小火灾的控制能力有很大提高。从以上国内外可燃物研究的历史可以看出,早期主要侧重于研究森林可燃物的描述、分类和负荷量静态信息,之后开始研究可燃物的动态信息以及林火对可燃物的影响等方面内容^[5:14]。

要更进一步的研究森林的燃烧性,首先要对可燃物模型研究予以足够的重视,我国在林火行为的研究上比发达国家起步晚,是从50年代才开始逐渐发展起来的,可燃物模型研究具有普遍的意义,它是林火行为预报、林火计算机仿真的基础;其次研究消除可燃物的有效措施,对林内可燃物进行科学管理,通过营林用火、微生物分解、生活利用、等有目的减少林内不必要的可燃物数量,达到有效地降低森林火险的目的。

1.3 林火仿真研究进展

我国森林火灾很频繁,损失严重,其中一个重要原因是我国森林防火科研力量不足,预防和扑救森林火灾的科学技术手段还不够先进。加上用于森林防火科学研究工作的资金投入较少,防火基础设施薄弱,控制森林大火的能力不强。因此,必须加强基础设施建设,提高我国林火行为预测上的准确性^[85]。

林火蔓延是一个多相、多组分可燃物在各种气象条件(温度、湿度、风向、风力等)和地形影响下燃烧和运动的极其复杂的现象^[86-88],至今还没有一种模型能完全模拟林火行为的每个方面^[89]。

1.3.1 林火仿真定义

森林防火仿真系统就是利用地形地貌, 根据林火行为的特点, 综合温度、湿度、风向等气象因素, 坡度、坡向、坡位等地理因素, 以及可燃物类型等, 建立仿真模型, 形成真实的森林火灾环境, 仿真林火的发生、发展和蔓延^[90]。并建立三维立体的飞行模拟, 让用户以任何视角感受火灾的现场环境。随着多媒体技术、计算机动画、传感技术的发展, 计算机模拟外界环境对人的感官刺激开始成为可能。事实证明, 人类对于图像、声音等感官信息的理解能力远远大于数字和文字等抽象信息的理解能力。把虚拟现实技术引入系统模拟仿真的各个阶段, 可使人沉浸其中, 对所需解决的问题有清晰的认识, 而不必在屏幕外面去观察仿真结果, 将使模型的建立和验证更加方便^[91]。

1.3.2 林火仿真研究方法及展望

采用一种改进的粒子系统对林火焰运动和造型进行模拟^[92-93]。该粒子系统的原理是: 给图元指定动态的、具有Alpha 通道的纹理图片或噪声纹理。这些图片是某个动态自然现象过程的整体反映。对于每一帧(或每几帧), 按照时间顺序更换纹理。这样, 只需要一个单一的图元(四边形或三角形或其他), 就可以实现某些粒子系统用成百上千的图元才能表达出来的景象。该粒子系统是一种纹理映射和传统粒子系统的发展, 它的各个图元采用了纹理映射的方法, 而又拥有粒子系统的一些优点, 这些图元也遵守一定动力学原理, 如火势行为受一定的重力、风向和浮力等因素的影响。这种方法实现的火焰和烟雾方法简单、运行速度和显示速度快、逼真度高, 比较适合用于森林火灾系统。

鉴于林火蔓延模拟的高度复杂性, 研究工作中只考虑林火常见的地表火的蔓延情况, 飞火、地下火。模型是今后考虑的方向; 真实的林火蔓延不仅受风向、火势行为的影响, 也受地形及自然景观的影响, 其过程模拟则更为复杂。用粒子系统表达小范围的林火行为可以满足一定的视觉效果, 但是在表达大范围的林火行为时存在失真现象。粒子系统用随机函数模拟林火行为, 而现实中的林火是物化反应的结果, 与实际情况尚有一定差距(用物理方法模拟更能真实地反映现实的火但达不到实时绘制的要求)。今后研究重点放在进一步完善模型, 考虑更多控制参数及大范围林火行为真实感模拟等方面^[94]。

1.4 研究的目的和意义

1.4.1 研究目的

石漠化使得植被破坏,物种减少,水土流失严重,河道库坝淤堵,不仅恶化了农业生产条件和生态环境,还使广大群众失去赖以生存的基本条件,后果十分严重。而石山岩溶地区自然条件恶劣,造林绿化难度大,从事石漠化治理研究一直被视为畏途,研究单位很少,可借鉴和利用的研究成果及配套技术不多^[95],特别是石漠化植被恢复初期,生态系统较为脆弱,一旦遭遇森林火灾,损失将十分严重。由于石漠化在我国受到极大的重视,因此石漠化地区植被恢复的任务十分重大。由于石漠化地区初期地表易燃可燃物大量积累,使得火险性更为严峻。一旦发生火灾,损失将无法计算,因此研究邵阳县石漠化地区植被恢复模式林分燃烧性为科学经营与管理森林、提高石漠化植被恢复过程中的林火管理水平等提供理论依据。

我国森林火灾很频繁,损失严重,对森林燃烧性的研究固然重要,事实证明,人类对于图像、声音等感官信息的理解能力远远大于数字和文字等抽象信息的理解能力。把虚拟现实技术引入系统模拟仿真的各个阶段,可使人沉浸其中,对所需解决的问题有清晰的认识,在屏幕外面去观察仿真结果,将使模型的建立和验证更加方便。

1.4.2 研究意义

本研究通过测定石漠化地区不同植被恢复模式林分的可燃物负荷量,燃烧热及水分析出速率的方法,研究不同树种的燃烧性能及其组成成分的燃烧性能,对比分析石漠化地区不植被恢复模式的林分燃烧性能,并且研究结果通过三维软件可视化对火行为进行仿真,使得结果变得更加为直观,为石漠化初期植被恢复林分的森林防火工作提供科学依据。

本研究属于导师主持的国家林业局石漠化定位监测项目(20080408)的部分内容。

2 研究区概况、研究内容和研究方法

2.1 研究区概况

研究地位于湖南省邵阳县谷洲镇，地理位置为东经 111°29′，北纬 27°5′。位于湘中偏西南，地处衡邵盆地西南边缘向山地过渡地带。东邻邵东、祁东，西靠隆回、武冈，南连新宁、东安，北接邵阳市区和新邵。见图 1。

2.1.1 地形地貌

本研究地地处衡邵盆地西南边缘,向山地过渡地带。以岩溶丘陵地貌为主，山地、岗地、平地次之。地势南高西低，中北部突起，垂直升降幅度较大。海拔最高点河伯岭 1454.9m，最低点枳木山龙湾滩 210m，高差 1244.9m。东有四明山余脉高霞山，南有河伯岭，西有湖北岭、阳乌岭，中部黄荆岭横亘，北部地势低缓，海拔一般在 300m 左右。

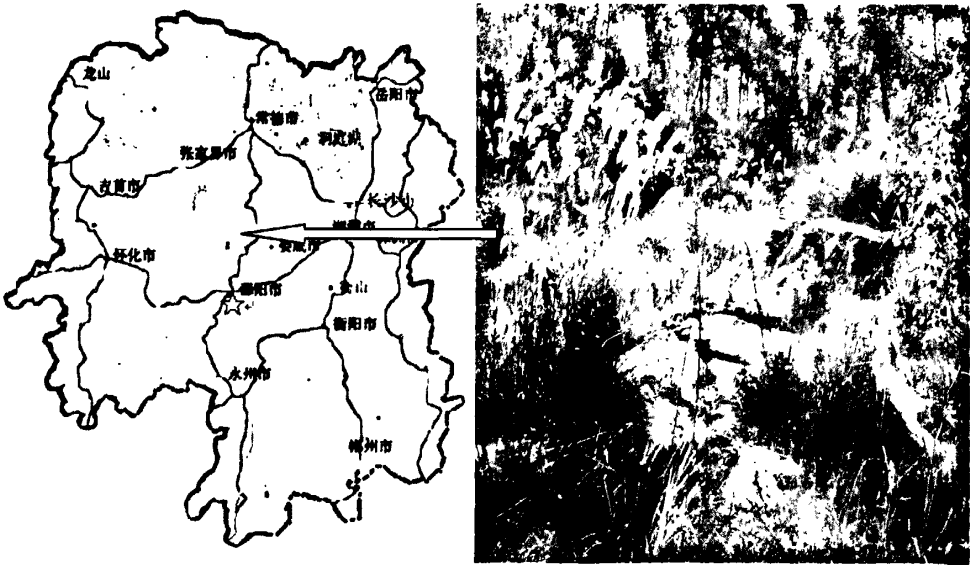


图 1. 研究区的地理位置和石漠化状况

Fig.1 A sketch for position and vegetation restoration present situation of the study site

2.1.2 土壤

成土母岩母质有石灰岩风化物、板页岩风化物、砂岩风化物、紫色砂、页岩风化物、第四纪红色粘土和近代河流冲积物六类。以石灰岩风化物为主。

土壤主要有山地红壤、山地黄壤、山地黄棕壤、山地草甸土、红色石灰土、黑色石灰土、紫色土、潮土八个类。主要以红色石灰土为主。

2.1.3 气候

邵阳县属中亚热带季风湿润性气候。具有温和湿润、阳光充足、雨量充沛、无霜期长、冰冻期短的特点。年平均气温 17.0℃，极端高温 40.1℃，极端低温 -10.1℃，持续时间很短。无霜期 290 天，年日照时数 1610 小时。年降水量 1314.2mm，年蒸发量 1180mm。春夏之交多暴雨，冬秋之间常干旱。

2.1.4 水文

全县河溪密布，大小 68 条，总流程 748.6km，流域面积 1998.3km²。我县是资江的上游和湘江水系的发源地之一，其中资江干流长度 38.5km，一级支流 11 条，二级支流 20 条，主要有郝水、芙蓉水、檀江、槎江、石马江等。湘江水系境内有支流 4 条，主要有祁水、芦洪江及其发源地。此外，县内有中型水库三座。据邵阳县水利局统计资料：地表水年径流 2.7 亿立方米；年坪输沙量 500 万吨；地下水储量 1118 万立方米，可开采的为 783 万立方米。

2.1.5 植被

属中亚热带常绿阔叶林带华东区系。植物种类繁多，全县森林植物有 139 科，325 属，672 种。其中木本植物有 83 科，228 属，486 种。以针叶纯林为主，阔叶林、针阔混交林、灌木经济林次之。

2.2 研究内容

对邵阳县谷洲镇石漠化地区植被恢复模式林分内所有造林模式中有效可燃物进行采样分析，对其燃烧性指标进行分析，包括四个部分的内容：各植被

恢复模式林分内可燃物燃烧热即热值的研究分析;各植被恢复模式林分内可燃物含水率的研究分析;各植被恢复模式林分内可燃物负荷量的研究分析;植被恢复模式林分火行为仿真。基于上述四部分基础,对邵阳县石漠化地区不同植被恢复模式林分的燃烧性进行比较,对不同植被恢复模式林分进行火行为仿真,从而为石漠化初期植被恢复林分的防火工作提供科学依据。

2.2.1 可燃物理化性质与林分的燃烧性

可燃物的理化性质包括化学特性和物理性质。含水率、热值等为树种抗火性能的主要分析因子,本文主要研究可燃物的物理性质即主要分析因子:可燃物的热值和含水率。可燃物的燃烧热即热值越高,则燃烧后释放出的热量越大,可燃物的含水率越高则越不易燃,含水率越低则越易燃。

(1) 热值即单位质量可燃物在 25℃, 101kPa 下完全燃烧时放出的热量。燃烧热值的测量一般采用氧弹式热量仪,植物热值是评价植物营养成分及木材的燃烧性能的指标之一,燃烧热值是评价植物燃烧性能的指标之一。林分中可燃物热值的大小,是评价林分中可燃物燃烧性能好坏的指标之一,对不同植被恢复模式中可燃物热值的调查比较是研究林分燃烧性的一个重要的环节。热值是能量的尺度^[96],不同可燃物具有不同的热值,一般情况下,可燃物热值越高,释放能量越多,反之,越少,而热值越高其易燃性越强。热值作为评价各树种易燃性强弱的重要指标。

(2) 可燃物达到燃点的速度和可燃物释放所得热量大小的决定因素之一就是可燃物含水率,含水率也影响着林火的发生蔓延和强度,是进行森林火灾监测的重要因素。可燃物含水率和可燃物燃烧性之间的关系十分密切,一般认为,含水率越高,可燃物的易燃性越弱。一般采用烘干恒重法对可燃物的含水率进行测定。本文对邵阳县石漠化地区植被恢复模式林分中植被各器官的相对含水率及其析水速率进行测定计算,为此地区的森林防火工作提供科学的依据。

2.2.2 可燃物负荷量的研究

可燃物负荷量是指单位面积上可燃物的烘干重量,它包括所有活的、死的有机物。根据可燃物负荷量的大小就可以预测不同可燃物类型的潜在能量分布和潜在火行为,研究林分中可燃物负荷量对评估森林的燃烧性起着重大作用。对于林

火管理者及火生态研究者而言,植物群落中可燃物负荷量的动态信息具有重要意义。在确定气象和环境的条件下,可燃物负荷量大小明显影响着林火发生的行为特征。

在邵阳县石漠化地区植被恢复模式林分中,对林分内所有乔木,灌木,草本植物,凋落物等有效可燃物负荷量进行调查计算,为研究林分的燃烧性提供一个重要指标。

2.2.3 林火行为仿真

森林火灾是突发性很强、危害极大的自然灾害。近一个世纪以来人类不断尝试用各种方法探索林火的诱发因子和有效的观测手段、研究燃烧和蔓延机理,以达到最终控制火的目的。作为林火行为的主要表现形式,林火蔓延的定量分析和建模更是为众多机构的研究方向^[97]。林分火行为仿真的研究依赖于林火行为的研究和计算机技术的发展,同时也同生产实践的需要有关。林火仿真研究有助于人们了解和预测林火的蔓延趋势范围,从而为抗灾、减灾和评估灾后损失提供依据^[98]。

根据前面对理化性质的研究得出邵阳县石漠化地区不同植被恢复模式林分燃烧性的强弱,而建立不同三维可视化模型,对此地区可能发生的火行为进行模拟仿真,使得相关研究人员能够更直观的对火行为有详细了解,其对火灾扑救,森林防火有科学的指导意义。

2.3 研究方法

森林燃烧的物质基础是森林可燃物,不同的可燃物种类,其燃烧性也有很大差异。森林可燃物的性质在很大程度上取决于构成森林的树种,它直接或间接影响森林可燃物的性质和数量。其中林分内可燃物的热值、含水率、负荷量这三大因子与林分的燃烧性密切相关。因此,测定分析树种的相关基础数据,可为研究森林着火、蔓延、能量释放、火强度测算及防火树种筛选等提供依据。根据以上三大因子得出的不同植被恢复模式林分的燃烧性强弱,从而进行林分的火行为仿真,为灭火决策提供依据。

2.3.1 林分及标准地调查

对邵阳县谷洲镇石漠化区不同植被恢复模式人工林进行林分基本情况调查，了解不同植被恢复模式造林时间和经营状况；调查土壤及其厚度、海拔、坡度、坡向、林木及其林下植被的生长状况等。选择不同地势，能代表不同模式林分基本情况的地方设置标准地（20m×10m），每个标准地选取三个有代表性的小样方。调查标准地的立地条件，每次采样前，对标准地内的树木测一次胸径（D）、树高（H）和冠幅（P）；对林下灌木、草本目测其平均盖度。表 1 为冬夏两季节邵阳县石漠化地区不同植被恢复模式的林分特征：

表 1.5 种植植被恢复模式林分特征

Tab. 1 Characteristics of the 5 patterns vegetation restoration stand							
造林模式 Patterns of reforestation	造林时间 Reforestation Years	株数密度 Density (株·Ha-1)	平均树高 Average tree height (m)	平均基径/胸 径 Average basal diameter or DBH (cm)	坡向 Aspect	坡度 Slope	坡位 Slope Position
枫香纯林 (LFPF)	2003	450/800	0.8	1.68	南坡 S	8°	上坡 Uphill
侧柏纯林 (POPF)	2003	1400	2.81	4	西北 WN	4°	上坡 Uphill
湿地松+枫香 林 (PLMF)	2003	湿地松 800 枫香 700	3.83 1.05	6.92 2.18	南坡 S	5°	下坡 Downhill
枫香+侧柏林 (LPMF)	2003	枫香 600 侧柏 850	2.19 1.58	2.16 2.43	北坡 N	5°	中坡 hillside
湿地松纯林 (PEPF)	2003	1600/250 0	5.07	7.79 (DBH)	北坡 N	10°	下坡 Downhill

PEPF is *Pinus elliottii* Pure Forest; POPF is *Platycladus orientalis* Pure Forest; PLMF is *Pinus elliottii* and *Liquidamba formosana* Mixed Forest; LPMF is *Liquidamba formosana* and *Platycladus orientalis* Mixed Forest; LFPF is *Liquidamba formosana* Pure Forest.

2.3.2 野外样品采集

在湖南省火灾季节内（调查时间为 2008 年 11 月，与 2009 年 7 月），采用直接收获法测定。分两次从邵阳县谷洲镇不同植被恢复模式林分采取可燃物样品（其间补采样品两次），用以分析可燃物的理化性质，包括热值，含水率，及负荷量。

2.3.2.1 乔木层样品的采集

对标准地内进行每木检尺,在每木检尺的基础上,根据 5 种不同植被恢复模式选取标准木,把树体剖解为叶、枝、干、皮和根五个部分,为取得更为准确的养分含量,将枝、叶按枝龄、叶龄做进一步分区,根系也按根头、大根($>0.5\text{cm}$)、中根($0.2\sim 0.5\text{cm}$)、细根中根($<0.2\text{cm}$)等级加以区分。干材、树皮按不同部位区分,取得分析样品 200~250g 带回实验室恒温烘干,用于研究乔木层的生物量及营养元素分布。

2.3.2.2 灌木、草本、凋落物样品的采集

在 5 种不同植被恢复模式的标准地内设置 3 个 $1\text{m}\times 1\text{m}$ 的小样方,将林下植被连根拔起,不同种植物混合采样 200~250g。在小样方内尽可能的均匀采集凋落物样品 200~250g,分别带回实验室恒温烘干,用于研究林下植被、凋落物样品的生物量及营养元素分布。

2.3.3 可燃物负荷量的测定

2.3.3.1 乔木层可燃物负荷量测定

在湖南省火灾季节内(2008 年 11 月)及植被生长季节(2009 年 7 月)分别在邵阳县谷洲镇石漠化地区各采集样品一次(其间补采样品两次)。乔木生物量的测定由于研究范围和仪器条件的限制仍然使用传统方法,首先对谷洲镇不同植被恢复林分进行全面踏查,根据林分特征及立地条件一致、树种、林分密度分布应均匀的原则,采用抽样调查的方法在不同植被恢复模式的基础上选择 $10\text{m}\times 20\text{m}$ 的样地,对每块标准地立木进行每木检尺,测定乔木树种的 DBH 或基径、树高、枝下高、冠幅等,然后求算出平均树高和胸径,以此在每块样地各选 3 株标准木。分别在根颈处将所选的样本伐倒后采用“分层切割法”,均按 1m 区分段锯断,分别称重并计算出树干,树皮,树枝,树叶各部分的鲜重。将取回的鲜样带回,在 105°C 恒温箱中烘干至恒重,算出各器官的含水率,再换算出干物质重量。

其中,因枫香纯林样地的枫香高度均不足 1.3m 高,所以选取 3 棵高度和胸径接近平均树高和胸径的枫香挖取,分别按根、茎、叶取样,带回实验室以供研究。

2.3.3.2 草本、灌木及林下凋落物可燃物负荷量的测定

采用“收获样方法”测定草本、灌木及凋落物样品的生物量，在不同植被恢复模式样地内设置 3 个 1m×1m 的具有代表性的小样方，采取小样方内的植被，去除土粒及杂质，在野外分别称取干枝、叶、根系及地上、地下草本植物和凋落物质量，取样带回实验室以 105℃烘箱进行烘干至恒重，求出干鲜重之比，将每个样方中的灌木鲜重按干鲜重之比换算成干重，累计相加得灌木、草本及凋落物的生物量，再求每公顷的生物量。

2.3.4 可燃物热值的测定

用于测定热值的样品，在85℃烘箱进行烘干至恒重，将已经烘干的样品，磨碎并通过孔径2 mm筛，装于铝盒中，用热量计法测定其热值含量，每份样品重复5次。仪器采用长沙三德仪器厂生产的SDC311 型微电脑氧弹式热量计。样品热值以干重热值（每克干物质在完全燃烧条件下所释放的总热量，简称 GCV ）来表示。

2.3.5 可燃物含水率的测定

将样品在85℃恒温条件下烘干，每隔10min称重一次。重复此过程，直到样品前后两次的重量差小于0.1g（该样品同时用于测定燃烧热值）。样品烘干后，将其磨粉、过筛贮备用。另取小样在105℃下烘干至恒重，求含水率。含水率的计算公式为^[99]：

$$\text{绝干含水率} = \frac{\text{鲜样重} - \text{绝干重}}{\text{绝干重}} \times 100\%$$

$$\text{相对含水率} = \frac{\text{鲜样重} - \text{绝干重}}{\text{鲜样重}} \times 100\%$$

$$\begin{aligned} \text{水分逸出率} &= \frac{\text{鲜样含水率} - \text{处理样含水率}}{\text{鲜样含水率}} \times 100\% \\ &= \frac{\text{鲜样重} - \text{处理样重}}{\text{鲜样重} - \text{绝干重}} \times 100\% \end{aligned}$$

2.3.6 数据处理及分析

在室内实验所得数据的基础上,对实验区内不同植被恢复模式林分中可燃物的含水率、热值、负荷量通过Excel 和VFP进行分析处理,以得出各种可燃物的燃烧性。然后各种可燃物的燃烧性,确定不同植被恢复模式林分的燃烧性。

2.3.7 林分火行为仿真模拟

利用三维软件进行三维实体快速建模。指根据采集到的数据,利用建模软件建立起各种地理实体,如地形、建筑物、道路、水面、树木、草地等虚拟现实系统中的模型,用流体火焰粒子系统模拟林分中火的强度大小,再加以重力场,风场模拟真实干扰。建立虚拟仿真环境,借助 Autodesk Maya 软件,实现林火区域的真实环境,再现林火发生后的火行为特征。

3 结果与分析

林分的燃烧性主要是由林分内可燃物决定,可燃物的燃烧性是由多个因素共同作用的结果,本文对邵阳县石漠化地区 5 种(湿地松纯林、侧柏纯林、湿地松+枫香混交林、枫香+侧柏混交林,枫香纯林)不同植被恢复模式林分中可燃物进行热值,含水率,负荷量的测定与分析,得出各植被恢复模式林分燃烧性能的强弱。在此基础上,再根据林火蔓延的特征,进行林火行为仿真。

3.1 可燃物理化性质与燃烧性

有效可燃物(Effective Fuel, EF)是指特定天气条件下可能燃烧的可燃物,包括直径小于 0.6 cm 活可燃物以及枯枝落叶,其是森林火灾的引燃物,对一般森林火灾起着决定性作用。

潜在可燃物(Potential Fuel, PF); PF 则是在强烈大火中可能烧掉的可燃物重量,包括树干和直径大于 0.6 cm 的枝,是造成特别重大森林火灾的主要因素。另外,火灾的发生和发展主要受林下植被种类和数量的影响。因此,本研究的主要对象主要为林下植被中的有效可燃物(Effective Fuel; EF)以及部分乔木层中的潜在可燃物。

通过室内试验测定邵阳县石漠化地区湿地松纯林、侧柏纯林、湿地松+枫香混交林、枫香+侧柏混交林,枫香纯林等 5 种不同植被恢复模式内的 EF 及部分 PF 的热值,水分逸出率,相对含水率,从而分析各林分的燃烧性

3.1.1 相对含水率与析水速率比较

可燃物含水率与林火行为密切相关。森林可燃物含水率直接影响可燃物着火的难易程度,间接影响火强度、火蔓延速度及有效辐射,且还有冷却效应,促进烟的形成和减少热量产生的作用。可燃物的燃烧性受诸多因子的影响,其中含水率是最主要的因子,它是通过影响可燃物在燃烧过程中的热量传递来影响可燃物燃烧性^[100]。

3.1.1.1 防火期内的相对含水率与析水速率

此次采样时间为2008年11月为初冬季节,是湖南省火灾高发时间,特别是

在石漠化地区。将5种植被恢复模式中主要EF种类的相对含水率统计到表2；图1和图2为主要EF水分逸出过程图。

由表2可知：在湖南省火灾季节，5种植被恢复模式中林下EF的相对含水率相对较小。含水率最小EF的为凋落物，都在25%以下，其中，纯林中的凋落物的相对含水率小于混交林中的凋落物含水率。草本以湿地松纯林中的白茅的相对含水率为最大，为42.63%；侧柏纯林中的白茅相对含水率最小，为：23.65%；从灌木来看，相对含水率最大的为：侧柏纯林中的牡荆枝叶，为：44.75%；最小的为：枫香+侧柏混交林中的云实枝叶，相对含水率为：35.73%；防火期内5种植被恢复模式林分中有效可燃物的平均相对含水率大小排序为：湿地松+枫香混交林>湿地松纯林>枫香纯林>枫香+侧柏混交林>侧柏纯林。

从图1可知，5种植被恢复模式中主要EF水分逸出时间最短的为凋落物，其次是草本植物中的马鞭草、匍匐臂形草和白茅；灌木的枝叶水分逸出的时间相对较长。同种EF在不同的植被恢复模式中，水分的逸出速率也不一样，从图2可以看出，白茅在侧柏纯林中，失水速度最快，在160 min时，水分逸出率就达到90%，时间也最短，只用290min，就完全烘干；而在其它几种植被恢复模式中，水分逸出速度较慢，烘干所消耗的时间长、能量多，其中湿地松+枫香混交林中失水时间长达390 min。

表2. 防火期内5种植被恢复模式林分有效可燃物负荷量、含水率和热值
Tab. 2 EFL, GCV and RH of the 4 pattern vegetation restoration stand during the fireproof time

可燃物种类 Fuel Type	湿地松纯林 (PEPF)				侧柏纯林 (POPF)				湿地松+枫香混交林 (PLMF)				枫香+侧柏混交林 (LPMF)				枫香纯林 (LPPF)			
	含水率	热值	载量	含水率	热值	载量	含水率	热值	载量	含水率	热值	载量	含水率	热值	载量	含水率	热值	载量		
	RH %	GCV kJ·g ⁻¹	EFL t·hm ⁻²	RH %	GCV kJ·g ⁻¹	EFL t·hm ⁻²	RH %	GCV kJ·g ⁻¹	EFL t·hm ⁻²	RH %	GCV kJ·g ⁻¹	EFL t·hm ⁻²	RH %	GCV kJ·g ⁻¹	EFL t·hm ⁻²	RH %	GCV kJ·g ⁻¹	EFL t·hm ⁻²		
白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	42.63	18.37	6.26	23.65	18.08	4.80	39.76	17.61	40.08	17.97	1.90	41.27	18.37	2.57						
凋落物 Forest Litter	18.88	20.31	1.11	17.82	17.97	1.36	24.21	16.04	24.64	17.07	0.70	22.15	15.49	0.69						
马鞭草 <i>Verbena officinalis</i>	-	-	-	40.53	17.34	2.95	-	-	-	-	-	40.54	17.22	1.90						
匍匐臂形草 <i>Brachiaria reptans</i>	-	-	-	-	-	-	42.47	17.31	1.63	-	-	-	-	-						
苔藓 <i>Bryophyta</i>	24.78	12.22	0.8	-	-	-	-	-	40.69	16.76	0.53	-	-	-						
云实枝叶 <i>Caesalpinia decapetala</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	35.73	18.47	0.79	-	-	-						
牡荆枝叶 <i>Vitex negundo</i>	-	-	-	44.75	18.35	0.78	-	-	36.79	18.68	1.24	41.53	18.45	0.02						
小计 Subtotal	37.66	18.03	8.17	29.55	17.87	9.89	38.75	17.37	36.59	17.97	5.16	37.12	17.34	5.18						

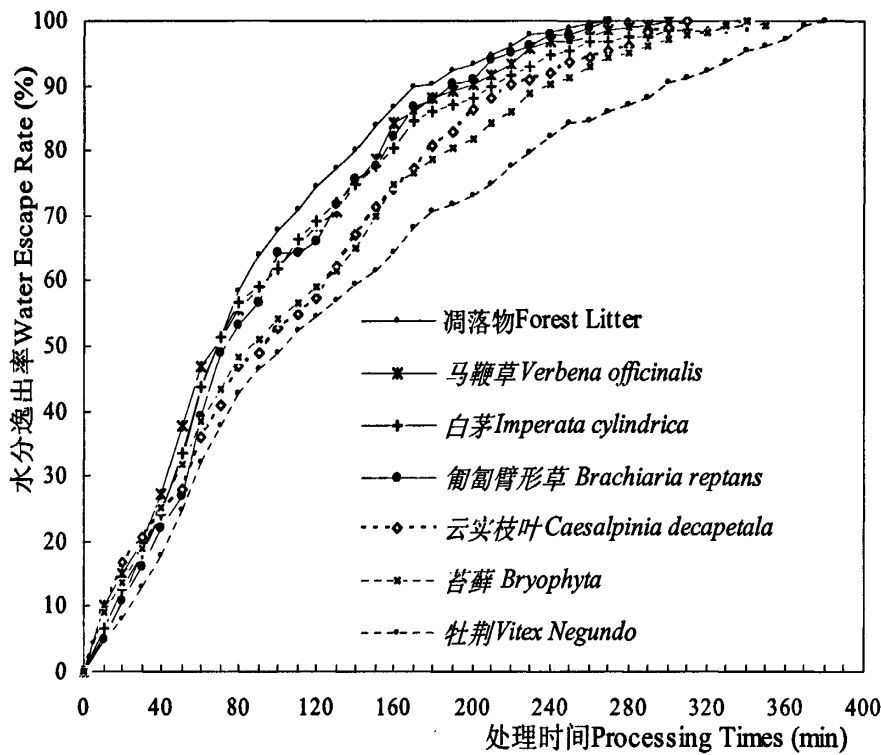


图 1. 防火期内 5 种植被恢复模式中有效可燃物的水分逸出过程

Fig. 1 The water escape process of the efficient fuel in the 5 pattern vegetation restoration stand during the fireproof time

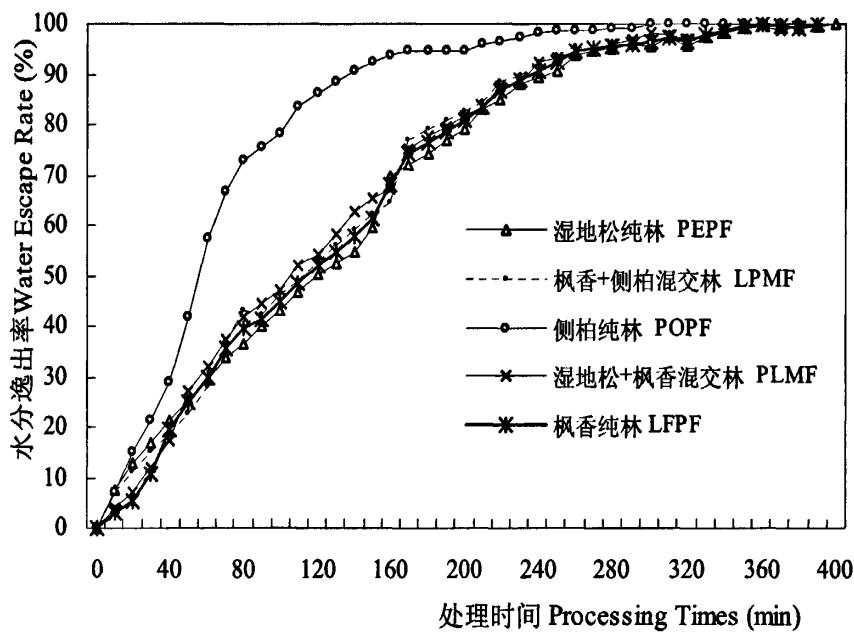


图 2. 防火期内 5 种植被恢复模式中白茅的水分逸出过程

Fig. 1 The water escape process of Imperata cylindrica in the 5 pattern vegetation restoration stand during the fireproof time

3.1.1.2 非防火期内的相对含水率与析水速率

第二次采样时间为2009年7月，是植被的生长季节。将此次采样的5种植被恢复模式中林下主要EF种类的相对含水率统计到表3；图3和图4、图5，为林下主要EF水分逸出过程图。

由表3可知：在湖南省非火灾季节，5种植被恢复模式中EF的平均相对含水率相对较高。从个体来看，含水率最小的EF为湿地松纯林内的苔藓，大小为15.45%；其次是凋落物，含水率为：18.19%~20.68%都低于25%；其中，纯林中的凋落物含水率小于混交林中的凋落物含水率；草本里面以枫香+侧柏混交林中的野菊花含水率最大，为71.19%；灌木中以侧柏纯林中的牡荆的相对含水率最高为：61.56%。5种植被恢复模式林分为：枫香纯林、侧柏纯林、湿地松+枫香混交林、湿地松纯林、湿地松+枫香混交林的EF平均相对含水率分别为：56.41%、50.00%、48.13%、54.03%、51.68%。

白茅为5种植被恢复模式中固有的草本类型，具有一定得可比性，从图3可知，侧柏+枫香混交林中的白茅失水时间最短为240min；侧柏纯林中的白茅失水时间最长，为：310min；其他植被恢复模式中的白茅失水时间分别为：枫香纯林：250min、湿地松纯林：260min、湿地松+枫香混交林260min。其中湿地松纯林中的白茅失水速率最快，在130min时，水分逸出速率达90%以上，其次为侧柏+枫香混交林中的白茅，在140min时水分逸出速率达到90%以上。

表 3. 非防火期内 5 种植被恢复模式林分有效可燃物负荷量、含水率和热值

Tab. 3 EFL, GCV and RH of the 5 pattern vegetation restoration stand during the non-fireproof time

可燃物种类 Fuel Type	枫香纯林 (LFPF)			侧柏纯林 (POPF)			枫香+侧柏混交林 (LPMF)			湿地松纯林 (PEPF)			湿地松+枫香混交林 (PLMF)		
	含水率 RH %	热值 GCV kJ·g ⁻¹	载量 EFL t·hm ⁻²	含水率 RH %	热值 GCV kJ·g ⁻¹	载量 EFL t·hm ⁻²	含水率 RH %	热值 GCV kJ·g ⁻¹	载量 EFL t·hm ⁻²	含水率 RH %	热值 GCV kJ·g ⁻¹	载量 EFL t·hm ⁻²	含水率 RH %	热值 GCV kJ·g ⁻¹	载量 EFL t·hm ⁻²
白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	33.81	17.18	1.49	58.76	17.34	1.34	59.44	17.20	1.51	56.89	17.58	1.33	60.00	17.56	1.43
凋落物 Forest Litter	-	-	-	18.19	17.24	0.50	20.68	15.60	0.40	20.19	18.42	0.60	-	-	-
匍匐臂形草 <i>Brachiaria reptans</i>	53.53	17.10	1.53	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
苔藓 <i>Bryophyta</i>	-	-	-	-	-	-	35.37	12.47	0.55	15.45	11.31	0.93	-	-	-
飞蓬 <i>Conyza Canadensis</i>	61.70	17.18	0.77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
野蒿 <i>Erigeron annuus (Linn.)</i>	66.87	16.91	0.64	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
五节芒 <i>Miscanthus floridulu</i>	69.15	16.48	0.92	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
狗牙根 <i>Cynodon dactylon</i>	-	-	-	55.46	17.33	1.54	-	-	-	-	-	-	42.69	16.81	6.05
剪股颖 <i>Agrostis Palustris</i>	-	-	-	35.13	11.09	1.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-
野菊花 <i>Dendranthema indicum</i>	-	-	-	-	-	-	71.19	17.76	0.46	-	-	-	-	-	-
牡荆枝叶 <i>Vitex negundo</i>	-	-	-	61.56	18.00	1.11	58.34	17.76	1.18	57.07	18.64	7.93	52.19	18.71	1.04
构骨枝叶 <i>Ilex cornuta Lindl</i>	-	-	-	-	-	-	58.23	18.97	2.18	-	-	-	-	-	-
小计 Subtotal	56.41	17.06	5.34	50.00	15.86	4.42	48.13	17.39	2.92	54.03	17.36	10.79	51.68	17.18	7.48

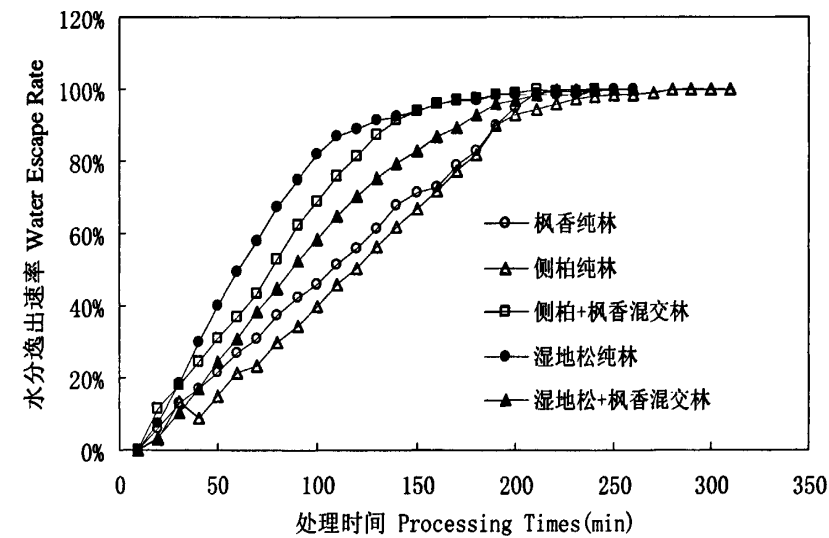


图 3. 非防火期内 5 种植被恢复模式中白茅的水分逸出过程

Fig. 3The water escape process of the *Imperata cylindrica* in the 5 pattern vegetation restoration stand during the non-fireproof time

图 4 为 5 种植被恢复模式中灌木枝叶的水分逸出过程,其中失水时间最短的为构骨枝,完全失去水分消耗 200min; 失水时间最长的为构骨叶片,完全失水消耗 280min; 其中失水最快的为构骨枝,仅用 120min 就失去水分逸出速率就达 90%以上。

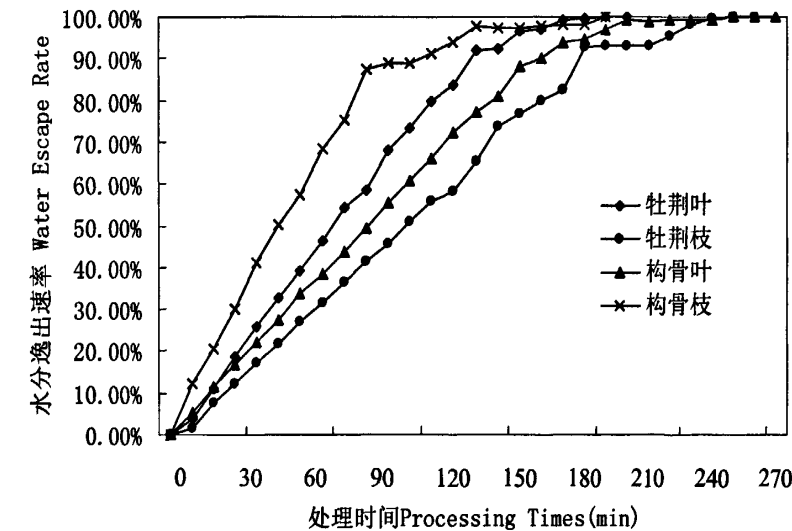


图 4. 非防火期内 5 种植被恢复模式中灌木的水分逸出过程

Fig. 4 The water escape process of the shrub in the 5 pattern vegetation restoration stand during the non-fireproof time

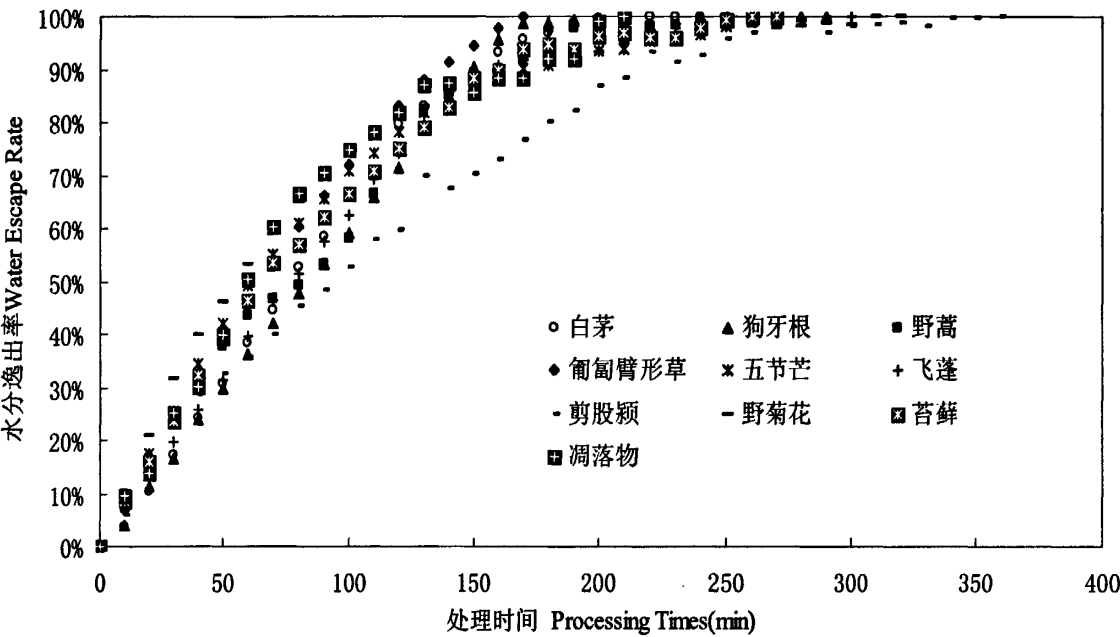


图 5. 非防火期内 5 种植被恢复模式中草本的水分逸出过程

Fig. 5 The water escape process of the herbaceous in the 5 pattern vegetation restoration stand during the non-fireproof time

图 5 为 5 种植被恢复模式中主要草本植物的水分逸出过程,其失水时间长短排序为: 剪股颖>野菊花>飞蓬>狗牙根>野蒿=五节芒>白茅>匍匐臂形草;其中失水的最长时间为: 360min, 最短的时间为: 170min。说明剪股颖烘干消耗时间长, 能量多。匍匐臂形草失水速度最快, 在 140min 时, 水分逸出速率就达 90%以上; 其次为狗牙根, 在 150min 时, 水分逸出率达 90%以上; 这些草本植被中, 剪股颖失水最慢, 在 220min 时, 水分逸出率才达到 90%以上。

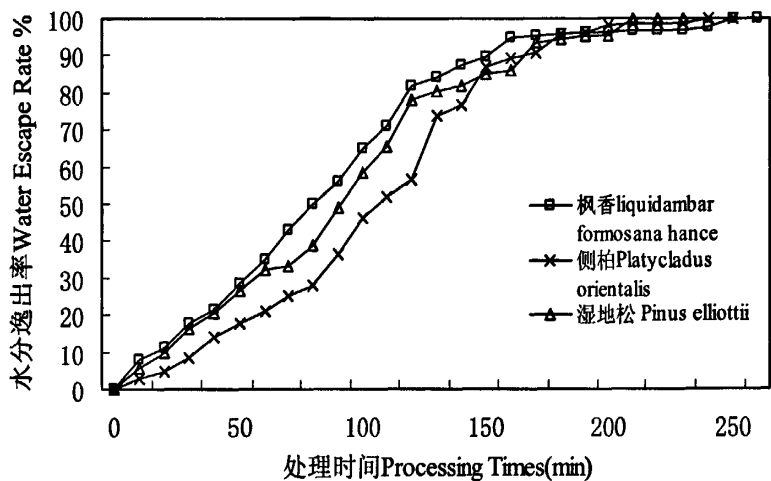


图 6. 三种乔木老叶的水分逸出过程

Fig. 6 The water escape process of three arbor older leaves in the 3 pure pattern vegetation restoration stand

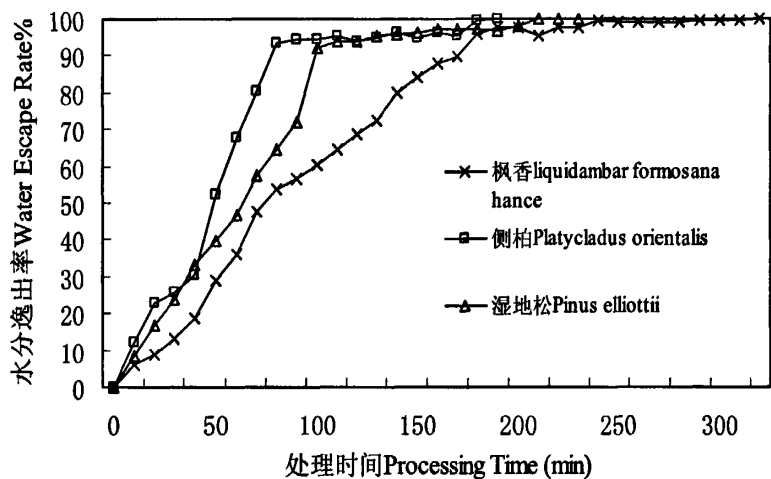


图 7. 三种乔木细枝的水分逸出过程

Fig. 7 The water escape process of three arbor fine branches in the 3 pure pattern vegetation restoration stand

枫香，侧柏，湿地松，为邵阳县石漠化地区主要植被恢复树种，图 6 为三种纯林植被恢复模式中主要乔木老叶的水分逸出过程，此三种乔木老叶失水时间长短排序为：枫香老叶>侧柏老叶>湿地松老叶，枫香老叶失水时间最长，为：260min，湿地松老叶失水时间最短，为：230min。图 7 为三种纯林植被恢复模式中乔木细枝的水分逸出过程，其中失水时间最长的为枫香细枝，为：

320min；失水时间最短的为柏木细枝，为：190min。

3.1.2 有效可燃物的燃烧热值

燃烧热值是评价植物燃烧性能的指标之一，可燃物的发热量影响着火温度和火的蔓延过程^[10]。可燃物热值是指在绝干状态下单位质量的可燃物完全燃烧时所放出的热量。树种燃烧时放出的热量，对林分的燃烧性有重要影响，一般来说，热值高的可燃物燃烧时释放的能量较大，火强度大；热值低的可燃物燃烧时释放能量少，火强度小。

3.1.2.1 防火期内有效可燃物燃烧热值

由表2中的热值可知：防火期内5种植被恢复模式林分中EF的燃烧热值为12.22~20.31 kJ·g⁻¹。其中灌木的燃烧热值为18.35~18.68 kJ·g⁻¹；苔藓的热值为：12.22~16.76 kJ·g⁻¹。不同可燃物类型的燃烧热值的大小顺序为：灌木>草本>苔藓。

对于活地被物，同种可燃物类型在不同植被恢复模式中的燃烧热值大小不同。白茅是5种模式林分中共有的可燃物类型，由图8可知，湿地松纯林与枫香纯林中的白茅燃烧热值最高，同为：18.37 kJ·g⁻¹，湿地松+枫香混交林中白茅燃烧热值最小为：17.61 kJ·g⁻¹；极差为：0.76 kJ·g⁻¹。并且，白茅燃烧热值在混交林中的大小小于在纯林中的大小。

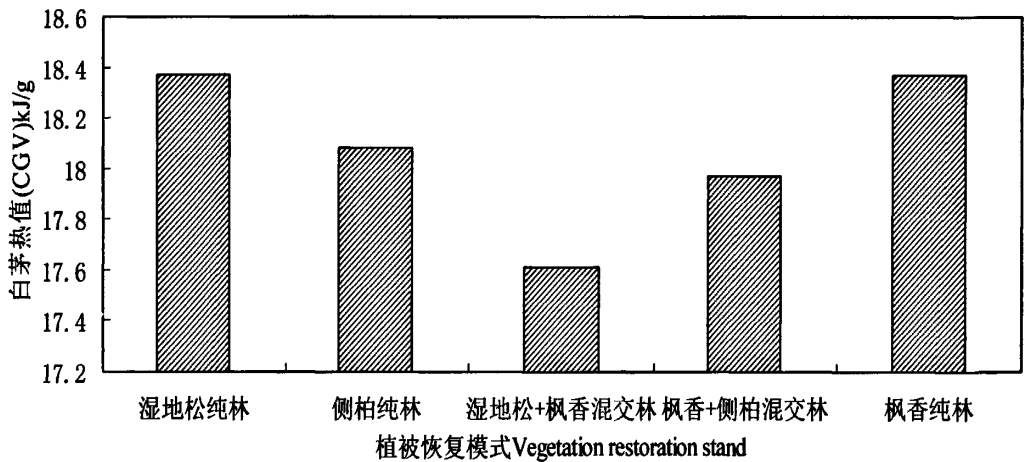


图 8. 防火期内 5 种植被恢复模式中白茅的热值比较

Fig.8 The calorific value of *Imperata cylindrica* in the 5 pattern vegetation restoration stand during the fireproof time

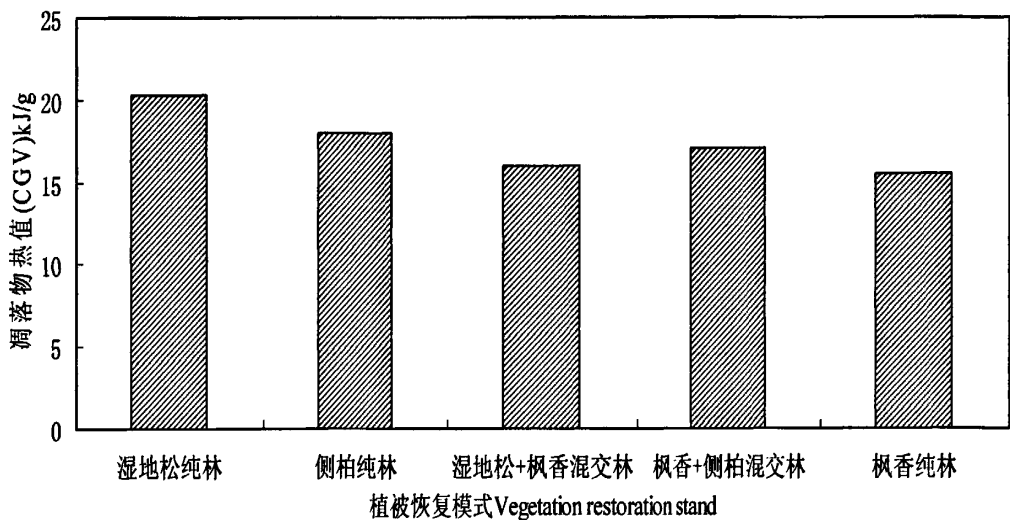


图 9. 防火期内 5 种植被恢复模式中凋落物的热值比较

Fig.9 The calorific value of forest Litter in the 5 pattern vegetation restoration stand during the fireproof time

图9为5中植被恢复模式中凋落物的热值比较,可知,湿地松纯林中凋落物的燃烧热值最高,为 $20.31\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$;枫香纯林中凋落物的燃烧热值最低,为: $15.49\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$;极差为: $4.82\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。5种林分中,凋落物热值大小排序为:湿地松纯林>侧柏纯林>枫香+侧柏混交林>湿地松+枫香混交林>枫香纯林。

5种植被恢复模式中EF燃烧热值的加权平均值为:湿地松林>枫香+侧柏林>侧柏林>湿地松+枫香林>枫香纯林,且平均热值大小范围为: 17.34 到 $18.03\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$,极差只有: $0.69\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。由于单位重量可燃物燃烧热值相差不大,很难从热值的角度判定5种植被恢复模式林分燃烧性的差异。

3.1.2.2 非防火期内有效可燃物燃烧热值

由表3中的热值可知:非防火期内5种植被恢复模式林分中林下EF的燃烧热值为 $11.09\sim18.97\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$;其中最小燃烧热值为侧柏纯林中的剪股颖;最大燃烧热值为枫香+侧柏混交林中的构股枝叶;极差为: $7.88\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。其中灌木的燃烧热值为: $17.76\sim18.97\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$;草本的燃烧热值为: $11.09\sim17.58\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$;苔藓的燃烧热值为: $11.31\sim12.47\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$;凋落物的燃烧热值为: $15.60\sim18.42\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。不同可燃物类型的燃烧热值的大小顺序基本为:灌木>凋落物>草本>苔藓。

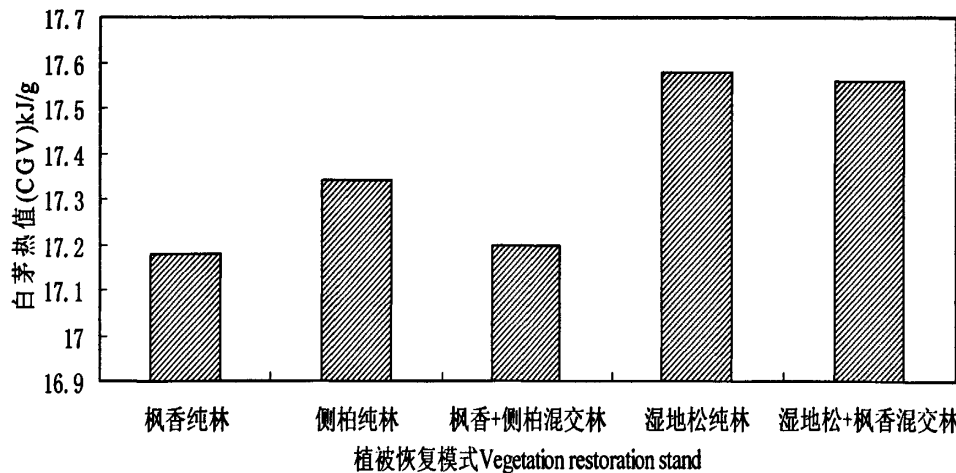


图 10. 非防火期内 5 种植被恢复模式中白茅的热值比较

Fig.10 The calorific value of *Imperata cylindrica* in the 5 pattern vegetation restoration stand during the non-fireproof time

图 10 为非防火期内 5 种植被恢复模式中白茅的热值比较，其中湿地松纯林中白茅热值最大，为： $17.58 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ ；比防火季节白茅的最大热值要小，白茅燃烧热值最小的是枫香纯林，为： $17.18 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ ；极差为： $0.4 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ ，说明非防火期内，白茅的燃烧热值在 5 种植被恢复模式林分中差别不大。

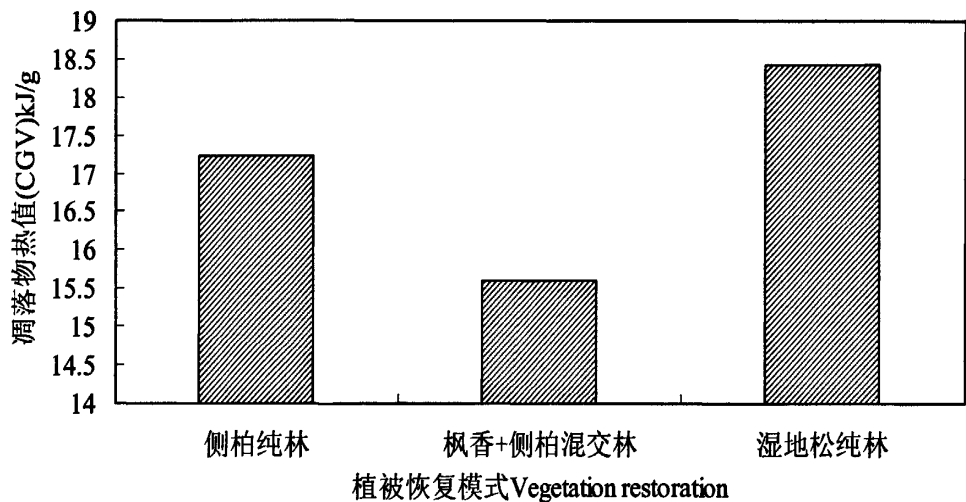


图 11. 非防火期内 3 种植被恢复模式中凋落物的热值比较

Fig.11 The calorific value of forest Litter in the 3 pattern vegetation restoration stand during the non-fireproof time

由于夏季是植被的生长季节，因此凋落物比较少，有些样地的凋落物可忽

略不计。图 11 为非防火期内 3 种植被恢复模式中凋落物的热值比较，从图中可知，湿地松纯林中凋落物的燃烧热值最大为： $18.42\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ ；最小的为枫香+侧柏混交林，为： $15.6\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。说明在非火灾季节内湿地松纯林，枫香+侧柏混交林，侧柏纯林中的凋落物需要及时清理。

3.2 不同植被恢复模式林分内可燃物负荷量

可燃物负荷量反映的是可燃物数量的多少，一般可燃物的负荷量越大越容易引起火灾。

3.2.1 防火期内有效可燃物负荷量

从表2可知：5种植被恢复模式的主要可燃物类型有：白茅（*Imperata cylindrica*）、马鞭草（*Verbena officinalis*）、匍匐臂形草（*Brachiaria reptans*）、苔藓（*Bryophyta*）、云实（*Caesalpinia decapetala*）、牡荆（*Vitex negundo*）。其中，白茅为所有样地中所共有的，且盖度均在0.9以上。因此，白茅是石漠化植被恢复早期主要的EF，在5种植被恢复模式中，白茅的负荷量大小顺序为：湿地松林>侧柏林>湿地松+枫香林>枫香纯林>枫香+侧柏林，最大的是湿地松纯林 $6.26\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，占77%；最小的是枫香+侧柏混交林 $1.90\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，占37%。

5种植被恢复模式中，林下总EFL的大小顺序为：侧柏林>湿地松林>湿地松+枫香林>枫香纯林>枫香+侧柏林，即：纯林基本大于混交林。EFL最大的是侧柏纯林（ $9.89\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ），最小的是枫香+侧柏混交林（ $5.16\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）。

表 4. 防火期内 5 种植被恢复模式中乔木的负荷量

Table 4. The effective fuel load of arbor of the 5 pattern vegetation restoration stand during the fireproof time

林分类型	树种	林分密度 ($t \cdot hm^{-2}$)	负荷量 ($t \cdot hm^{-2}$)				
			树干	树枝	树叶	树皮	合计
湿地松纯林 (PEPF)	湿地松	1600	7.13	1.15	4.75	-	13.3
侧柏纯林 (POPF)	侧柏	1400	0.32	2.31	2.91	-	5.54
枫香纯林 (LFPF)	枫香	450	0.06	0.045	-	-	0.11
侧柏+枫香混交林 (LPMF)	侧柏	850	0.097	0.21	0.36	-	0.67
	枫香	600	0.55	0.52	-	-	1.07
	小计	1450	0.65	0.73	0.36		1.74
湿地松+枫香混交林 (PLMF)	湿地松	800	0.066	0.014	0.035	-	0.115
	枫香	700	0.87	0.92	-	-	1.79
	小计	1500	0.936	0.93	0.035		1.91

表4为防火期内5种植被恢复模式乔木层的负荷量,由于枫香在冬季为落叶季节,所以叶片几乎没有负荷量,由表5可知,无树皮的乔木负荷量最大的是湿地松纯林为: $13.3 t \cdot hm^{-2}$, 其中有效可燃负荷量为: $5.9 t \cdot hm^{-2}$; 最小的为枫香纯林,无树皮负荷总量为: $0.11 t \cdot hm^{-2}$, 其中有效可燃负荷量为: $0.045 t \cdot hm^{-2}$; 此五种样地无树皮乔木负荷总量大小排序为: 湿地松纯林>侧柏纯林>湿地松+枫香混交林>侧柏+枫香混交林>枫香纯林; 有效可燃负荷量大小排序为: 湿地松纯林>侧柏纯林>侧柏+枫香混交林>湿地松+枫香混交林>枫香纯林。由此可知从乔木层来看,一般也为纯林负荷量大于混交林负荷量。

3.2.2 非防火期内有效可燃物负荷量比较

从表 3 可知: 非防火期内 5 种植被恢复模式的主要可燃物类型有: 白茅

(*Imperata cylindrica*)、匍匐臂形草(*Brachiaria reptans*)、飞蓬(*Erigeron acer* L)、野蒿(*Erigeron annuus* (Linn.))、五节芒(*Miscanthus floridulu* (Labnll.) Warb)、狗牙根(*Cynodon dactylon*)、剪股颖(*Agrostis Palustris*)、牡荆(*Vitex negundo*)、苔藓(*Bryophyta*)、野菊花(*Dendranthemaindicum*)、枸骨(*Ilex cornuta* Lindl), 其中, 白茅为所有样地中所共有的, 并且盖度平均在 0.9 以上。所以, 在非防火期内, 白茅仍然是石漠化植被恢复早期主要的 EF, 在 5 种植被恢复模式中, 枫香+侧柏混交林的白茅负荷量最大, 为: 1.51 t·hm⁻²; 白茅负荷量大小顺序为: 枫香+侧柏混交林>枫香纯林>湿地松+枫香混交林>侧柏纯林>湿地松纯林, 其中白茅负荷量在各样地占的比例分别为: 枫香纯林: 27.90%, 侧柏纯林: 30.32%, 侧柏+枫香混交林: 51.71%, 湿地松纯林: 12.32%, 湿地松+枫香混交林: 19.12%。

5种植被恢复模式中, 林下总EFL的大小顺序为: 湿地松纯林>湿地松+枫香混交林> 枫香纯林>侧柏林。由上述可知, 湿地松纯林中EFL最大, 为: 10.79 t·hm⁻²; 侧柏纯林中EFL最小, 为: 4.42 t·hm⁻²。

表 5. 非防火期内 5 种植被恢复模式中乔木的负荷量
Table5. The effective fuel load of arbor of the 5 pattern vegetation restoration stand during the non-fireproof time

林分类型	树种	林分密度 (t·hm ⁻²)	负荷量 (t·hm ⁻²)				
			树干	树枝	树叶	树皮	合计
湿地松纯林 (PEPF)	湿地松	2500	5.21	0.89	3.75	0.36	10.21
侧柏纯林 (POPF)	侧柏	1400	0.24	1.6	1.1	0.04	2.98
枫香纯林 (LFPF)	枫香	800	0.11	0.09	0.07	0.02	0.29
	侧柏	850	0.14	0.7	1	0.02	1.86
侧柏+枫香 混交林 (LPMF)	枫香	600	0.35	0.35	0.09	0.07	0.86
	小计	1450	0.49	0.42	1.09	0.09	2.72
湿地松+枫香 混交林 (PLMF)	湿地松	800	0.6	0.12	0.43	0.08	1.23
	枫香	700	0.08	0.07	0.04	0.01	0.2
	小计	1500	0.68	0.19	0.47	0.09	1.43

表5为非防火期内5种植被恢复模式中乔木的负荷量, 其中湿地松纯林中的

乔木负荷总量最大,为: $10.21 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中有效可燃负荷量为树枝和树叶的总和,为: $4.64 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 枫香纯林中乔木的负荷总量最小,为: $0.29 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 说明在枫香纯林的长势较差,生境较脆弱。湿地松+枫香混交林的负荷总量也比较小为: $1.43 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中有效可燃负荷量为: $0.66 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 侧柏+枫香混交林的乔木负荷总量与侧柏纯林差别不大,分别为: $2.72 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $2.98 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

3.3 不同植被恢复模式林分内可燃物能量现存量

在某一时刻生态系统单位面积上全部或某类有机体或其组分中所包含的能量,称为能量现存量。能量现存量直接影响林火强度、火焰高度、火列度等火行为指标。

3.3.1 防火期内有效可燃物能量现存量

图12为5种不同植被恢复模式中EF的能量现存量,由图12可知:5种植被恢复模式中EF总能量现存量大小排序为:湿地松纯林>侧柏纯林>湿地松+枫香混交林>枫香+侧柏混交林>枫香纯林,其中最大的湿地松纯林为 $147.3 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$;最小的为:枫香为 $90.99 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$,极差为: $56.33 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。图3也表明:白茅的能量现存量在5种不同植被恢复模式中都占相当大的比重,其中最大的是湿地松纯林中的白茅,为 $115.00 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$,占78%;最小的是枫香+侧柏混交林,为 $34.14 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$,占37%。因此,要加强林地清理,减少易燃可燃物的积累,尤其是减少白茅的数量,以降低森林燃烧性。并且从能量现存量的角度来看,侧柏纯林和湿地松纯林中EF的能量现存量相对较高,说明了纯林燃烧起来放出能量大,因此燃烧性较强。

图13为防火期内5种植被恢复模式中乔木的能量现存量,其中,湿地松纯林的乔木能量现存量最高,为: $265 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$, 枫香纯林的乔木能量现存量最低,为: $8.86 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$, 湿地松枝的能量现存量在湿地松纯林中所占的比重最大,为: $142.1 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占53.6%, 其次为湿地松叶,为: $99.61 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占37.6%。防火期内五种乔木能量现存量的大小排序为:湿地松纯林>侧柏纯林>湿地松+枫香混交林>枫香+侧柏混交林>枫香纯林。

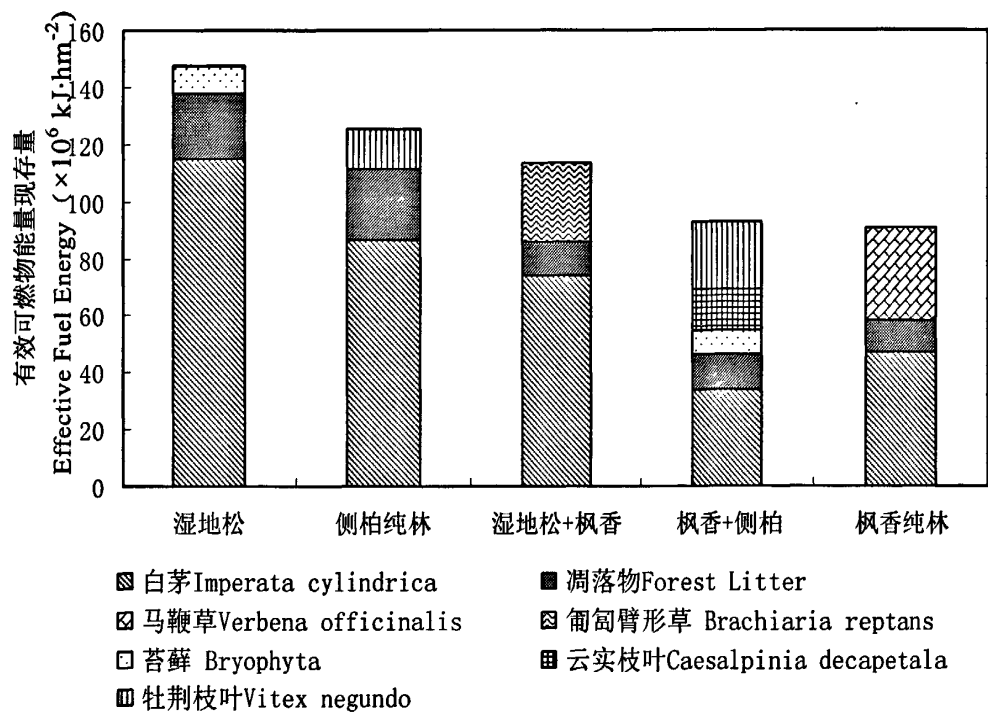


图12. 防火期内5种植被恢复模式中有效可燃物的能量现存量

Fig.12 The effective fuel energy of the 5 pattern vegetation restoration stand during the fireproof time

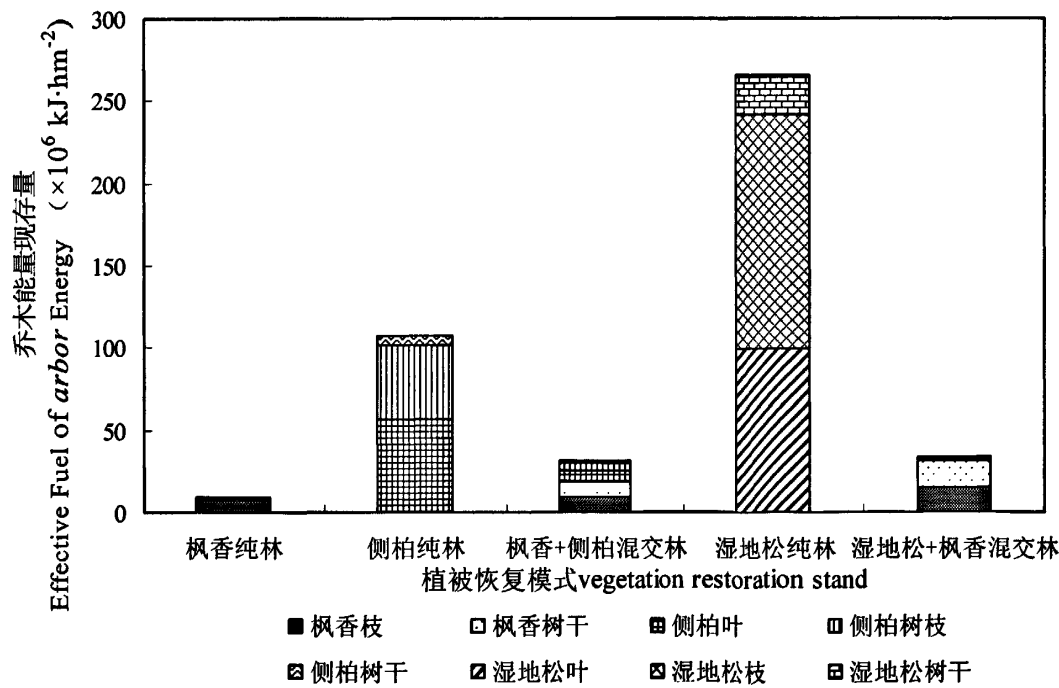


图 13. 防火期内 5 种植被恢复模式中乔木的能量现存量

Fig.13 The effective fuel energy of arbor of the 5 pattern vegetation restoration stand during the fireproof time

3.3.2 非防火期内有效可燃物能量现存量

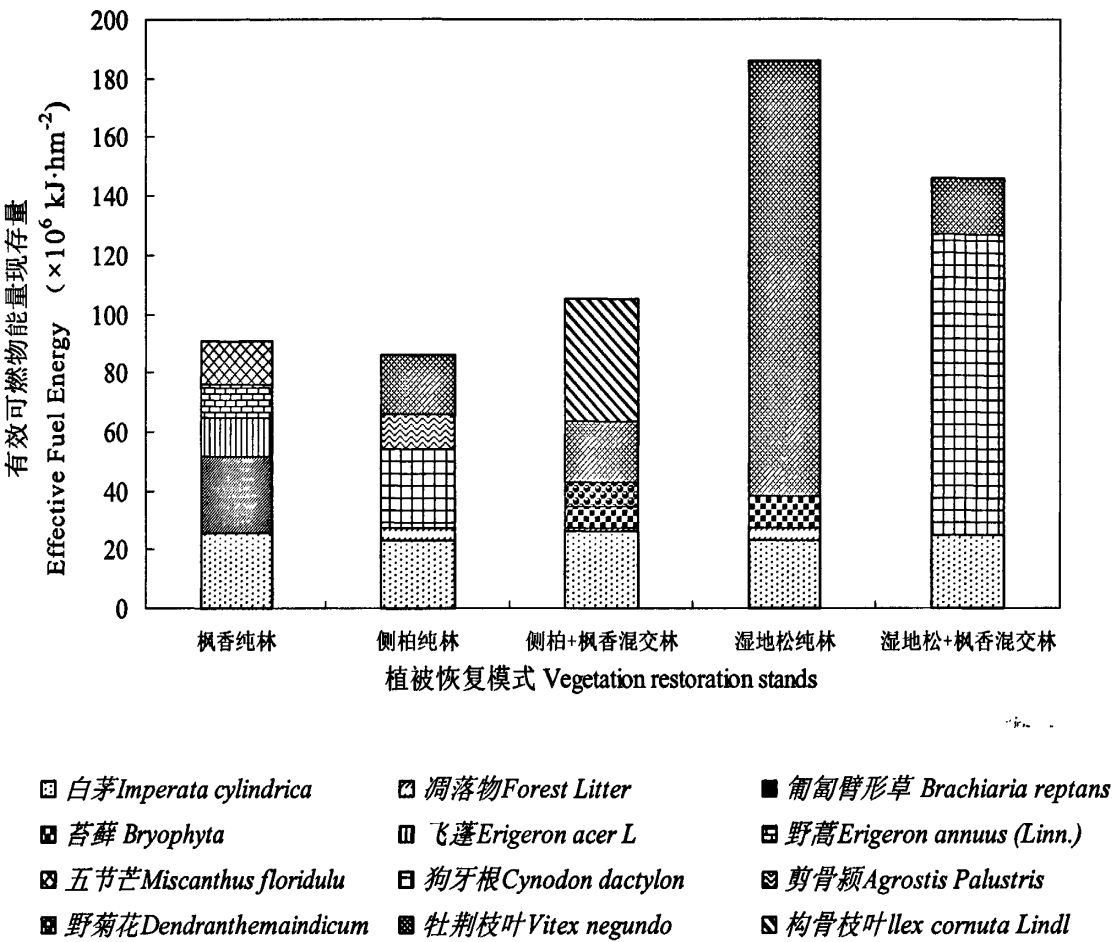


图 14. 非防火期内 5 种植被恢复模式中林下有效可燃物的能量现存量

Fig.14 The effective fuel energy under the forest of the 5 pattern vegetation restoration stand during the non-fireproof time

图14为5种不同植被恢复模式中林下EF的能量现存量，由图14可知：非防火季节5种植被恢复模式中EF总能量现存量大小排序为：湿地松纯林>湿地松+枫香混交林>侧柏+枫香混交林>枫香纯林>侧柏纯林；

其中能量现存量最大的是湿地松纯林为 $185.9 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，最小的侧柏纯林为 $85.76 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。极差为： $100.1 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$ ；图14也表明：白茅为5种样地共有的植物，但是非防火时期不同于冬季防火时期，白茅的能量现存量并不是在每块样地都占很大的比重。其中白茅在枫香纯林中占得比重最大，为 $25.59 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，占28.16%；由于夏天是植被的生长季节，所以植被类型较冬季要多，其中白茅能量现存量比例最小是为湿地纯林，为 $23.30 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，

占12.53%。在能量现存量最大的湿地松纯林中，牡荆枝叶的能量现存量占得比重最大，为 $147.8\times10^6\text{ kJ}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，占79.53%；湿地松+枫香混交林的能量现存总量仅次于湿地松纯林，为 $146.3\times10^6\text{ kJ}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；其中狗牙根的能量现存量比例占最大，为 $101.7\times10^6\text{ kJ}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，占69.52%，由上述可知，减少易燃可燃物的积累，尤其是减少牡荆，白茅，狗牙根的数量，可以降低森林燃烧性。

因此，从能量现存量的角度来看，湿地松纯林、湿地松+枫香混交林中的EF的能量现存量相对较高，说明了非防火期间内，这2种林分燃烧起来放出能量大，燃烧性较强。

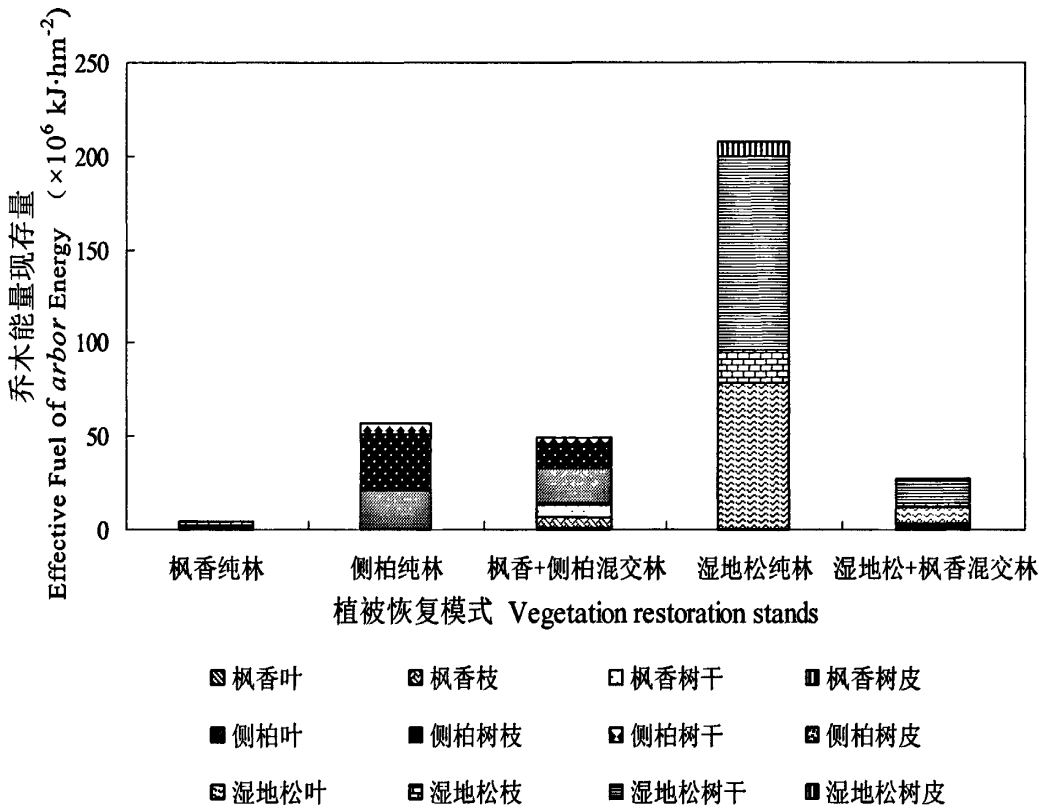


图 15. 非防火期内 5 种植被恢复模式中乔木的能量现存量

Fig.15The effective fuel energy of arbor of the 5 pattern vegetation restoration stand during the non-fireproof time

图15为5种植被恢复模式中乔木层的能量现存量，分别计算各种乔木的树叶，树干，树皮，树枝的能量现存量，以预测林火后期，火势的蔓延、大小及速度。由图15可知，乔木中能量现存量最大的是湿地松纯林，为： $207.6\times10^6\text{ kJ}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；最小的为枫香纯林，为： $4.91\times10^6\text{ kJ}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；极差为： $202.7\times10^6\text{ kJ}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；5种植被恢复模式的能量现存量大小排序为：湿地松纯林>侧柏纯林>枫香+侧柏混交林>湿地松+枫香混交林>枫香纯林；湿地松纯林中，湿地松树干的能量

现存量所占比重最大,为: $104.2 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占50.2%; 树皮能量现存量所占的比重最小,为: $7.24 \times 10^6 \text{ kJ} \cdot \text{hm}^{-2}$, 占3.50%。

由上述可知,能量现存量较高的两大纯林,在林火蔓延到乔木时,燃烧将释放比较大的能量,所以要及时清理林分中的可燃物,以防发生火灾,从而造成大的损失。

3.4 不同植被恢复模式林分林火行为仿真

林火行为是指森林可燃物从点燃开始,直至熄灭的整个过程所表现出来的特性^[103]。通过计算机模拟仿真森林火灾蔓延趋势是预防和实施森林火灾扑救的重要手段,精确的、实时的、全局的火场发展图对有效制定林火扑救决策具有重要意义^[104-105]。森林防火仿真系统就是利用地形因素(包括坡度、坡位、坡向),根据林火行为的特点,以及可燃物类型等,建立仿真模型,形成真实的森林火灾环境,仿真林火的发生、发展和蔓延。本文假设邵阳县林火发生,通过三维动画进行研究区域的视觉模拟,为扑救工作提供直观快速的辅助。

3.4.1 地形因子在林火仿真中的应用

在地形条件一定的情况下,林火的初始蔓延速度和风速的大小对林火蔓延有明显的影响,不同的初始蔓延速度会导致不同的蔓延结果,随着初始速度的增大,蔓延面积也相应的增加,不同的风速形成的火场面积不同,随着风速的增大,蔓延面积也相应增加;但如果火场的形状相似,坡向不同,接受阳光的照射不同,温度、湿度、土壤和植被都有差异,也会影响火场的面积,一般遵循以下规律:

(1) 坡向直接影响到地表接收到的太阳辐射的多少。位于南坡的林分比位于北坡的更容易燃烧,一旦发生林火,蔓延速度快。对于邵阳县而言,它的南向坡(包括南坡、东南坡、西南坡)接受的太阳辐射就相对较多,因此其地面温度比其他各坡向要高,空气相对干燥,容易发生森林火灾;

(2) 不同的坡位会导致林地内水分含量不同,进而也会影响林火的蔓延速度^[106]。一般来说,林分海拔愈高,林内温度越低,地被物含水率越大,越不易燃烧;

(3) 上山火蔓延速度随着坡度增加而增加。坡度每增加15°,林火蔓延速度增加一倍;坡度每增加10°,林火强度增加一倍。此外,坡度大小直接影着

可燃物湿度变化以及可燃物载量再分配过程。坡位不同对林火的发生与蔓延的影响也不同^[107]。

表6为5种植被恢复模式林分燃烧性的综合,由此表可知,从地形因子来看,五种植被模式林分的坡度差别不大。枫香纯林、湿地松+枫香混交林都位于南坡,侧柏纯林、枫香+侧柏混交林、湿地松纯林都位于北坡。枫香纯林、侧柏纯林都处于上坡位,湿地松纯林、湿地松+枫香混交林处于下坡位,枫香+侧柏混交林位于中坡。综合上述可知,就地形因素而言,假如林火发生,湿地松+枫香混交林的火蔓延速度将比较快。

3.4.2 林分燃烧性林火行为仿真中的应用

对于森林火灾而言,林分的燃烧性是一个极其重要的方面。而决定林分易燃性的就是林分内有效可燃物,所以要模拟林火发生的大小,蔓延速度,林分燃烧性是不可缺少的判定因子。表6中概括了判定5种植被恢复模式林分燃烧性的主要因子,具体分析如下:

(1) 在高火险季节里,侧柏纯林和湿地松纯林中的林下有效可燃物负荷总量,能量现存总量都比较高,说明一旦林火发生,这两种林分类型将释放出较大能量,能加快林火蔓延速度,扩大火场面积;

(2) 在高火险季节,侧柏纯林中林下有效可燃物的平均相对含水率最低,说明此林分中林下植被较易燃烧;

(3) 在非火险季节内,湿地松纯林和湿地松+枫香混交林中的林下有效可燃物负荷总量,能量现存量总量是最高的,此结果与高火险季节略有不同;

(4) 在非火险季节内,枫香+侧柏混交林中林下有效可燃物相对平均含水率最低,说明此林分中林下植被易燃烧,并且燃烧时间较短。

3.4.3 林火仿真中的场景建模及三维火粒子模拟方法

火灾场景为林火仿真中最主要,也是比较重要的一部分。本文通过运用 Autodesk Maya 对邵阳县石漠化地区5种不同植被恢复模式林分进行场景建模和火粒子真实模拟。(图16为林火仿真模拟中部分场景)

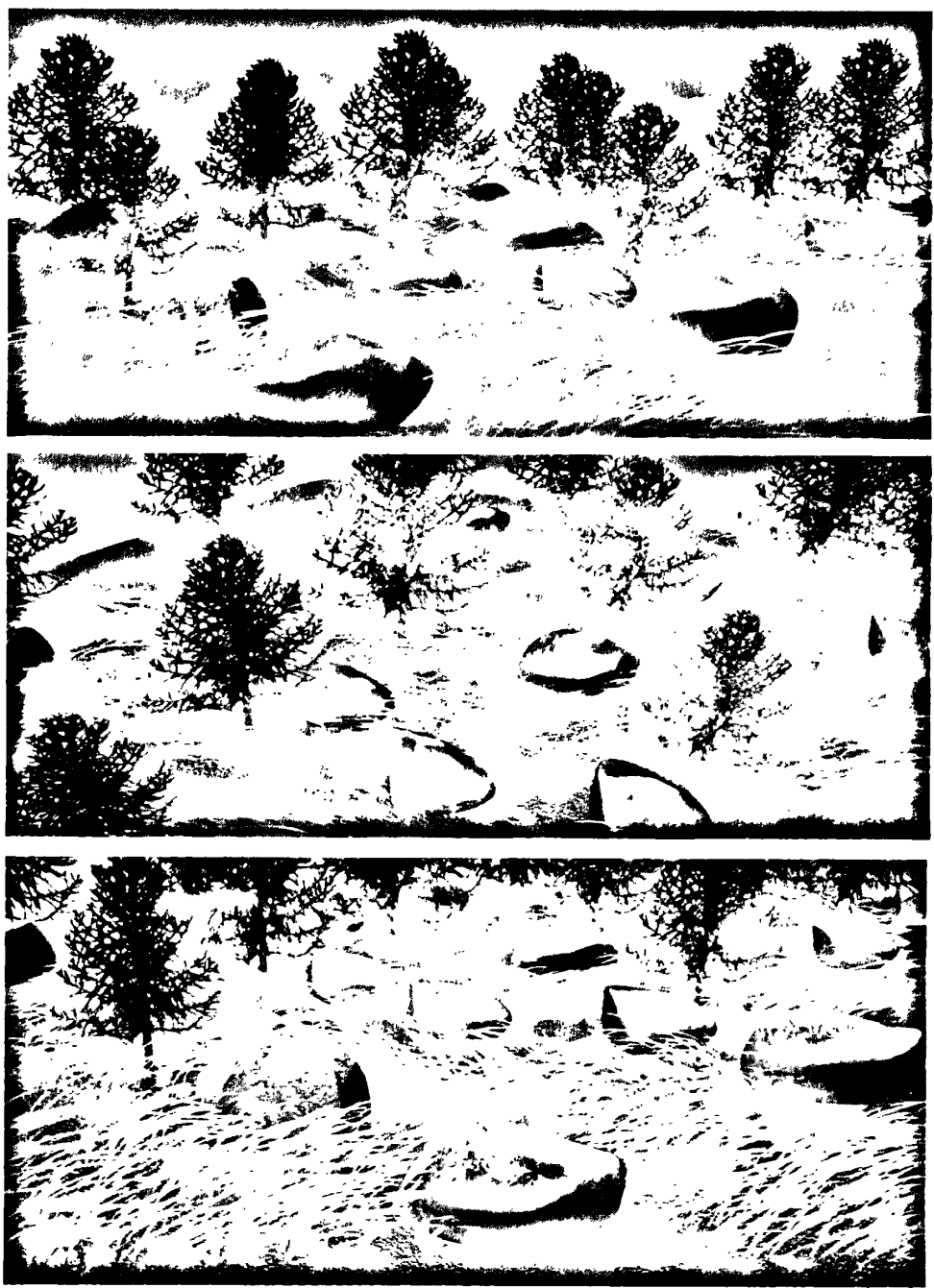


图16. 林火仿真结果

Fig.16 Results of the simulation to fire behavior

3.4.3.1 树木建模方法

在森林火灾场景中，树木不是最主要的关注内容，主要问题是该场景中火

灾如何蔓延而不是每一个树木的具体属性及形态信息;此外森林中树木的数量过于庞大,会严重地影响计算机的反应速度,不利于在该场景中进行火灾模拟。故对于虚拟森林火场中的树木模型创建,本文采用的是模型贴片的创建方法,即采用 Maya 中的 Poly 建出简单的面,贴上树木的图片,来模拟真实树木。具体方法如下:

(1) 在工具栏中选择 Polygons, 创建多边型面, 并调整其大小和方向;

(2) 设置树木模型要求的面的个数, 面的类型和面的高度。此次采用的是长方形面, 高度根据树的年龄有所不同;

(3) 生成完这两个面后, 选择树木的材质贴图, 然后设置贴图的属性信息来匹配需要创建的树木模型。

3.4.3.2 地形建模方法

地形创建对于建立一个虚拟森林火场场景, 是比较重要的一环, 也是首要的一环。它的坡度、坡向、坡位特性影响着后面对森林火模拟。根据表 6 中的坡度、坡位、坡向以及样地大小建立类似多边形地形。步骤如下:

(1) 在工具栏中选择 Polygons, 创建多边型面, 根据地形调整面上的点, 以达到与真实接近的效果;

(2) 对创建好的地面粗模进行细化 smooth, 调整细节;

(3) 打开 Hypershade 材质面板, 给建好的地形细模上好纹理和材质, 以便识别。

3.4.3.3 林下植被的建模方法

5 块样地中主要的林下植被为: 白茅、马鞭草、匍匐臂形草等草本和一些以牡荆为主的灌木。由于每个样地的草本盖度都很大, 特别是白茅, 达 90% 以上, 所以本文利用 Maya 中的 Fur 插件来模拟白茅以及其它主要草本, 具体操作步骤如下:

(1) 打开已经建立好的地面模型文件, 选择地面子物体;

(2) 创建 Fur, 点击菜单 Fur/Attach Fur Description1, 并调整面板中的一些参数, 如图 17 所示, 根据实地调查的资料, Density (密度) 调为: 13000, Base Color、Tip Color (草本颜色) 调为图中所示; Length (高度) 调为: 8,

即为 8 个网格单位（此次调查各样地白茅的高度为 0.8m）；Roll（弯曲度）按图中设置为：0.6；Base curl（倾斜度）设置为：0.6。其余的选项都为默认；

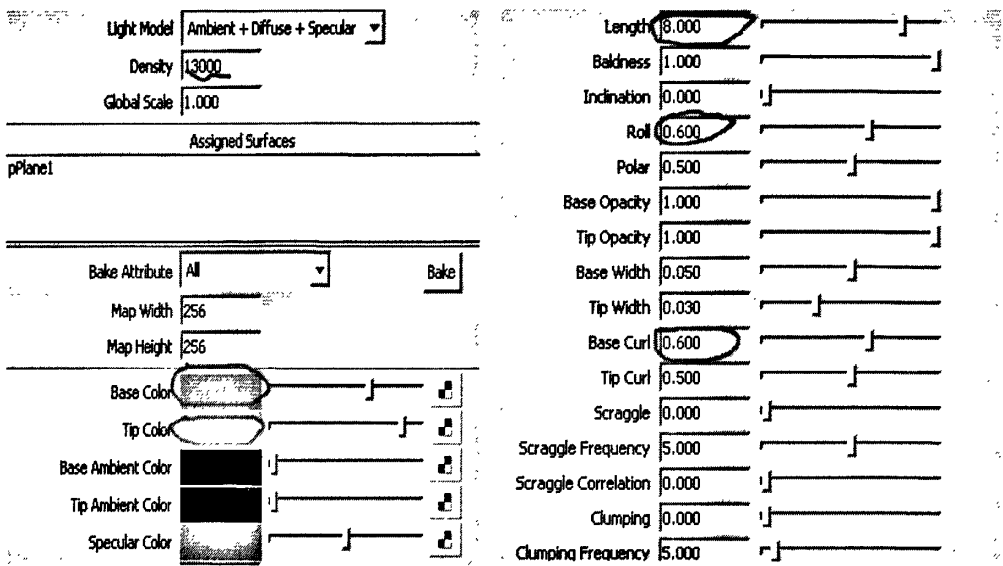


图 17. 林下草本模拟参数

Fig.17 The simulation parameter of herbal under the forests

（3）工具栏中选择 Polygons，创建多边型面，根据调查数据调整其高度和方向，贴上灌木贴图，用以模拟林下灌木。

3.4.3.4 三维火粒子模拟方法

火焰是火场中必不可少，也是最重要的一部分，若单纯采用建模纹理贴图方式来模拟火焰，将十分麻烦，并且难以模拟火的动态形状，要想很好的模拟火的动态效果就必须运用粒子系统对火焰进行真实仿真。具体操作步骤如下：

（1）选择已经建立好的地形模型，在 Dynamics 即 Maya 中的动力学模拟模块中选择 Effects 下面的子菜单 Create Fire，自动创建火粒子；

（2）根据不同林分的燃烧性能，及预测的火强度调整火粒子的参数，具体如图 18 所示，对于火强度较小的林分如枫香纯林、枫香+侧柏混交林，设置 Glow Intensity（火强度）为 0.350，Density（火密度）为 0.500；将侧柏纯林、湿地松纯林的 Glow Intensity（火强度）设为 0.600，Density（火密度）设置为 1；

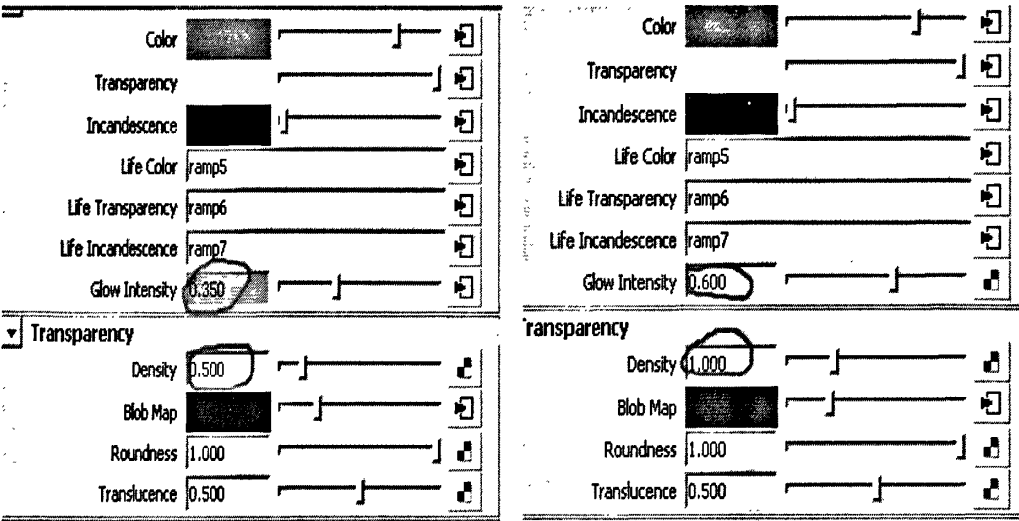


图 18. 林分火焰参数设置

Fig.18 Parameter settings of forest fire

(3) 给建立好的火焰粒子，加上同等的真实重力场、风场以模拟真实世界的火焰飘动。

3.4.4 林火行为仿真参考模型

(1) 基于能量守恒定律的半经验Rothermel模型抽象程度较高，几乎涵盖了能影响燃烧的所有因素。模型公式如下：

$$R=I_R \zeta (1+\Phi_w+\Phi_s)/\rho_b \varepsilon \phi_{ig} \quad (1)$$

式中， R 为林火蔓延速度(m·min⁻¹)； I_R为火焰反应强度[kJ·min⁻¹·m⁻²]； ζ为林火传播通率(无因次) ； Φ_s为坡度修正系数； Φ_w为风速修正系数； ρ_b为可燃物的密度(kg·m⁻³)； ε为有效加热数(无因次)； φ_{ig}为点燃单位质量的可燃物所需的热量(kJ·kg⁻¹)； 风的修正系数(Φ_w) 公式：

$$\Phi_w=C(3.281U)^B/\varepsilon/\varepsilon_{OP}/ \quad (2)$$

$$C=7.47\exp(-0.133\sigma^{0.55}) \quad (3)$$

$$B=0.02526\sigma^{0.54} \quad (4)$$

$$E=0.715\exp(-3.59\times10^4\sigma) \quad (5)$$

$$\varepsilon_{OP}=3.348\sigma^{-8189} \quad (6)$$

式中, σ 为燃料的表面积与体积之比, U 为风速坡度的修正系数。

(2) 澳大利亚的McArthur模型

$$R=0.13F$$

式中: R 为较平坦地面上的火蔓延速度 (千米/小时), 对于草地, F 具有如下形式:

$$F=2.0 \exp [-23.6+5.01 \ln B+0.0281 T_a-0.226 H_a+0.633 U^{0.5}]$$

F 为火险指数; B 为可燃物的处理情况; T_a 为气温; H_a 为相对湿度; U 为在10米高处测得的平均风速。

McArthur模型是Nobel I. R. 等人对McArthur火险尺度的数学描述。它不仅能预报火险天气, 还能定量预报一些重要的火行为参数, 是扑火, 用火不可缺少的工具, 但它可适用的可燃物类型比较单一, 主要是草地和按数林, 对我国南方森林防火具有一定的参考价值。

(3) 加拿大林火蔓延模型

加拿大林火蔓延模型是加拿大火险等级系统采用的方法, 根据加拿大的植被情况, 可燃物可划分为5大类型; 针叶林, 阔叶林, 混交林, 采伐基地和开阔地, 并细分为16个代表总结出多数可燃物蔓延速度方程, 但所有方程是以最初蔓延指标 (ISI) 为独立边数, 它与细小的可燃物含水量和风速有关, 如对于针叶林的初始蔓延速度方程为:

$$ROS=a[1-e^{-bxISI}]^c$$

式中: ROS 为可燃物的蔓延速度 (米/分); a , b , c 分别为不同可燃物类型的参数; ISI 为初始蔓延指标。对于在斜坡上蔓延的火, 其蔓延速度只需要乘以一个适宜的蔓延因子即可, 蔓延因子可用下式表示:

$$S_f=e^{3.533(\lg \Phi)1.2}$$

式中, S 为蔓延因子 (无因次量), Φ 为地面的坡度。

加拿大林火蔓延模型属于统计模型, 它不考虑火行为的物理本质, 而是通过收集、测量和分析实际火场和模拟实验的数据, 建立模型和公式。其优点是能方便而形象的认识火灾的各个分过程和整个火灾的过程, 能成功的预测出和测试火参数相似情况下的火行为, 能较充分地揭示林火这种复杂现象的作用规律。它的缺点是这类模型不考虑任何热传机制。

表 6. 5 种植被恢复模式林分燃烧性综合

Tab.6 The combustibility of effective fuel under forest in the 5 pattern vegetation restoration stand											
造林模式 Patterns of reforestation	可燃物负荷总量 Total EFL (t·hm ⁻²)		加权平均热值 Weighted average GCV (kJ·g ⁻¹)		可燃物能量现存量 Effective fuel energy (10 ⁶ kJ·hm ⁻²)		平均相对含水率 Average RH %		坡向 Aspect	坡度 Slope	坡位 Slope Position
	防火期	非防火期	防火期	非防火期	防火期	非防火期	防火期	非防火期			
枫香纯林 (LFPF)	5.18	5.34	17.34	17.06	91.0	90.9	37.12	56.41	南坡 S	8°	上坡 Uphill
侧柏纯林 (POPF)	9.89	5.28	17.87	15.86	134.2	85.8	29.55	50.00	西北坡 WN	4°	上坡 Uphill
湿地松+枫香林 (PLMF)	6.56	8.52	17.37	17.18	113.9	146.3	38.75	51.68	南坡 S	5°	下坡 Downside
枫香+侧柏林 (LPMF)	5.16	5.98	17.97	17.39	92.7	104.9	36.59	48.13	北坡 N	5°	中坡 Hillside
湿地松纯林 (PEPF)	8.17	10.42	18.03	17.36	147.3	185.9	37.66	54.03	北坡 N	10°	下坡 Downhill

4 结论和建议

4.1 结论

本论文以湘西南石漠化生态系统研究对象,以野外标准地调查和室内物理化学分析相结合的研究方法,对湖南省邵阳县谷洲镇 5 种植被恢复模式的林分的可燃物含水率和析水速率、可燃物燃烧热值、负荷量及能量现存量进行研究,取得了以下几个方面的主要结论:

(1) 湘西南石漠化生态系统植被恢复早期,最主要的 EF 为白茅、马鞭草、狗牙根、匍匐臂形草、野蒿等和以牡荆为主的一些灌木,白茅的盖度大,分布均匀,防火季节里 EFL 占 37%以上,是森林火灾发生和发展的危险可燃物类型。林下总 EFL 纯林大于混交林,其中,侧柏纯林最高($9.89 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),枫香+侧柏混交林最小($5.16 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$);非防火季节里,湿地松的 EFL 最高,为: $10.42 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。仅从 EFL 的大小来比较,侧柏纯林和湿地松纯林为最易燃烧的林分;

(2) 在防火季节内,湿地松+枫香混交林的EF平均相对含水率最大,并且水分逸出时间最长,燃烧性较差;侧柏林中EF水分逸出时间最短,析水速率最大,燃烧性最强。湿地松纯林中EF的含水率高,析水速度慢,时间长,原因是湿地松前期生长快,郁闭早,林下湿度大,不利于可燃物干燥,是石漠化植被恢复的优良树种。因此,从可燃物含水率和析水速率角度来分析,湿地松+枫香林属于阻火性能相对较好的林分类型。侧柏纯林是最易燃烧的林分类型;

(3) 除凋落物外,同种可燃物类型在不同植被恢复模式中的燃烧热值没有显著差异;而凋落物差异显著的原因是构成各种植被恢复模式林分中的凋落物成分不同。防火季节内,5种植被恢复模式中EF燃烧热值的加权平均值在 17.37 到 $18.03 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间;相差很小。所以,燃烧热值不是区分林分燃烧性的主要因子。但在非防火季节内, EF燃烧热值的加权平均值 5.86 到 $17.39 \text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,相差较大;

(4) 在防火期内,侧柏纯林和湿地松纯林中EF的能量现存量相对较高,说明纯林燃烧时释放的能量大,因此燃烧性较强;非防火期内,湿地松纯林、湿地松+枫香混交林中EF的能量现存量相对较高,所以不同季节,相同类型的林分燃烧性不一样。

(5) 不论是防火季节或非防火季节,湿地松纯林的乔木能量现存量都为最高,枫香纯林的乔木能量现存量最低。

(6) 在林分燃烧性研究的基础上,借助已有的林火蔓延模型,对林火行为进行了仿真模拟,真实地反映了森林火灾发生后的现实状况。可用于森林火灾指挥与扑救工作。

综合上述,湘西南石漠化植被恢复早期的防火季节内,白茅是主要的引燃物,在5种石漠化植被恢复模式林分中,纯林的燃烧性比混交林高。因此,建议植被恢复早期,要加强林地清理,尤其是对白茅的清理。但是,人们常采用放牧等措施来减少白茅的数量,由于植被恢复早期,放牧会严重影响幼树的生长,尤其是柏木。因此,有必要通过人为措施来减少白茅的数量,以减少林分易燃可燃物的积累,降低森林燃烧性;同时,在选择植被恢复模式的时候,宜用混交林代替纯林。

4.2 建议和存在的问题

森林燃烧性研究是一个多因素共同作用的结果,也是一个复杂的研究,由于各种条件限制,在对各因素的调查研究中考虑不够全面,收集更多,更加有效的影响因子是森林燃烧性研究的一个重要环节。同时,人工抚育是一种人为对森林环境的干扰,改变了林内的光照,温度等生境条件,会影响到各因子与燃烧性关系,邵阳县石漠化地区植被恢复模式林分的人工抚育措施有一定的规律,但本文并没有考虑人为干扰因子,因此会对研究的准确性有一定程度的影响。

对于可燃物负荷量的调查,由于采用收获法,对自然环境的破坏较大,如解析木的数量很难达到样本数量的要求,受到条件的限制每个标准地本次研究中都只能采伐一棵解析木,因此给本论文分析数据带来了一定的难度。研究尺度上,本次调查采用的是标准地调查的方法,在标准地数据演推到林分尺度上时,也会造成一定的误差。

林火蔓延模型的研究,由于时间关系本次研究利用的是国内外现存的模型进行预测和模拟仿真,但它对森林防火工作的指导作用十分直观,有利于森林防火工作的科学化发展。它必将成为森林防火工作的热点问题之一。

参考文献

- [1]郑焕能. 中国林火[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1993.
- [2]环境保护基本情况. 中国统计年鉴[M]. 北京:统计出版社, 2004.
- [3]环境保护基本情况. 中国统计年鉴[M]. 北京:统计出版社,2005.
- [4]谭文雄, 徐高福. 生物防火林带研究现状与建设展望[J]. 防护林科技, 2006, (3): 88-89.
- [5]单延龙. 大兴安岭森林可燃物的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 博士论文, 2003.
- [6]吴爱中, 罗秋良, 贺庚云, 刘华位. 攸县石漠化治理现状与对策[J]. 湖南林业科技, 2008, 35 (1): 76-77.
- [7]李琰琰. 虚拟森林火场的技术研究和场景建模[D]. 杭州:浙江工业大学, 硕士学位论文, 2006.
- [8]杨志高, 张贵, 钱少青. 森林火灾的计算机仿真研究[J]. 湖南林业科技, 2003, 30 (1): 58-62.
- [9]王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 2002, 21 (2): 101-104.
- [10] 王德炉, 朱守谦, 黄宝龙. 石漠化的概念及其内涵[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2004, 28 (6): 87-90.
- [11] 屠玉麟. 贵州喀斯特地区生态环境问题及其对策[J]. 贵州环保科技, 2000, 6 (1): 1-6.
- [12] 崔书红. 湿润地区的荒漠化[J]. 第四纪研究, 1998 (2): 173-179.
- [13] 王世杰, 李阳兵, 李瑞玲. 喀斯特石漠化的形成背景、演化与治理[J]. 第四纪研究, 2003, 23 (6): 657-666.
- [14] 李金平, 赵彬. 新邵县石漠化土地生物治理措施[J]. 林业调查规划, 2006, 31 (2): 59-61.
- [15] 李森, 魏兴琥, 黄金国等. 中国南方岩溶区土地石漠化的成因与过程[J]. 中国沙漠, 2007, 27 (6): 919-926.
- [16] 瞿林. 广南县岩溶森林保护及石漠化治理[J]. 林业调查规划, 2001, 26 (4): 71-75.

- [17] 覃勇荣, 韦丹妮, 黄健等. 不同植被恢复模式对石漠化地区土壤多酚氧化酶的影响[J]. 河池学院学报, 2007, 27 (2) : 41-45.
- [18] McRae,D.J., Jin, J.Z.,Conard, S.G., and Ivanova, G.A. Infrared characterization of fine-scale variability in behavior of boreal forest fires[J]. Can .J.F or Res. 2005, 35 (9) :2194-2205.
- [19] Schwilk, D.W. Flammability is a niche construction trait: canopy architecture affects fire intensity[J].The American Naturalist, 2003, (162) 6:725-733.
- [20] Moreno, J.M. and Oechel W.C. Fire intensity effects on germination of shrubs and herks in southern California chaparral[J]. Ecology, 1991, 72 (6) :1993-2004.
- [21] 牛树奎等. 北京喇叭沟门林区森林燃烧性及防火区研究[J].北京林业大学学报, 2000, 22 (4) :109-112.
- [22] 郑焕能. 中国东北林火[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社, 2000.
- [23] 王月. 辽宁东部地区森林地被可燃物及其燃烧性的研究[J].沈阳农业大学学报, 35 (1) : 24-28.
- [24] 胡海清, 牛树奎. 林火生态与管理[M]. 北京:中国林业出版社, 2005.
- [25] Carol Miller and Dean Urban. Connectivity of Forest Fuel and surface Fire Regimes[J]. Landscape Ecology, 2000, 15: 145-154.
- [26] 宋志杰, 等, 林火原理和林火预报[M]. 北京:气象出版社, 1989.
- [27] 卢振兰, 刘常梅, 韩国辉. 火生态研究方法综述[J]. 吉林林业科技, 2001, (6) :4-7.
- [28] 郑焕能等.森林防火学[M].北京:农业出版社, 1962.
- [29] 郑焕能等.林火管理[M].哈尔滨:东北林业大学出版社, 1988.
- [30] Deeming, John E. Robert E. Burgan and Jack D. Cohen. The National Fire-Danger Rating System-1978, USDA Forest Service, General Technical Report INT-39, 1977.
- [31] 单延龙, 李华, 其其格.黑龙江大兴安岭主要树种燃烧性及理化性质的实验分析[J].火灾科学, 2003, 12 (2) :74—78.
- [32] 文定元等. 森林防火基础知识[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.

- [33] 伊伯乐. 北京周边山地森林燃烧性与林分结构关系研究[D]. 内蒙古农业大学硕士学位论文, 2007.
- [34] 张建列. 火对可燃物的影响[J]. 森林防火. 1986, (3):34—35.
- [35] Carmen, E.P. kent's mechanical engineer handbooks. Power Volume, Sec.Z, Combustion and fuels. 12th ed. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1950:30-41.
- [36] Luke. R.H and A.G. McArthur. Heat yield and power out put in Bush fire in Australia. Australian Government publ. Serv. 1978:26.
- [37] Chandle. C. et al. Fire in Forestry I. John Wiloy & Sens Inc. 1983:35.
- [38] Grishin, A.M. and Golovanov, A.N. and Loboda, E.L. Problem of drying of a layer of combusible forest materials [J]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2001, 74 (4):919-928.
- [39] Grishin, A.M. and Golovanov, A.N. and Kataeva, L.Y. ,etal. Formulation and Solution of problem of drying of a layer of combustible forest materials[J], Combustion Explosion and shock waves, 2001, 37 (1):57-66.
- [40] Grishin, A.M. and Golovanov, A.N. and Medvedev, V.V. Oscillation of the elements of combustion[J] Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2001, 42 (4):672-679.
- [41] 刘自强, 王丽俊, 王剑辉等. 大兴安岭森林可燃物含水率燃点灰分的测定及其对易燃性燃烧性的影响[J]. 森林防火, 1993, (4).
- [42] 陈存及, 何宗明, 陈东华等. 37种针阔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.
- [43] 谢玉敏, 李军伟. 树种燃烧性研究[J]. 森林防火, 1999, (3):38—39.
- [44] 胡海清, 鞠琳. 小兴安岭8个阔叶树种的燃烧性能[J]. 林业科学, 2008, 44 (5):90-95.
- [45] 鲍雅静, 李政海, 韩兴国等. 植物热值及其生物生态学属性[J]. 生态学杂志, 2006, 25 (9):1095-1103.
- [46] 郭利峰. 北京八达岭林场人工油松林燃烧性研究[D]. 北京林业大学硕士学位论文, 2007.
- [47] 刘菲, 胡海清. 森林可燃物理化性质与燃烧性的研究综述仁[J]. 林火

研究,2005, (1) :29—30.

[48] 于海峰,朱万昌,吴东海等.大兴安岭主要乡土树种抗火性的探讨[J].森林防火,1998 (4) :17—18.

[49] 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.

[50] 舒立福,田晓瑞,苏开君.防火林带理论与应用[M].哈尔滨:东北林业大学出版社,2000.

[51] George M. Byram. Some Principle of Combustion and Their Significance in Forest Fire Behavior[J]. Fire Management Today, 2004, (64) 1:37-44.

[52] 毕玉芬,车伟光.几种苜蓿属植物植株热值研究[J].草地学报,2002,10 (4) :265-269.

[53] Woodard KR, Prine GM, Bachrein S. 1993. Solar energy recovery by elephantgrass, energycane, and elephantmillet canopies[J]. Crop Sci. 33 : 824 ~ 830.

[54] Golley FB. 1961. Energy values of ecological materials[J]. Ecology, 42 : 581 ~ 584.

[55] Andersen DC, Armitage KB. 1976. Caloric value of Rocky Mountain subalpine and alpine plants[J]. J. Range Manage. 29 (4) : 344 ~ 345.

[56] Sundriyal RC. 1992. Structure, productivity and energy flow in an alpine grassland in the Garhwal Himalaya[J]. J. Veg. Sci. 3 : 15 ~ 20.

[57] 陈章和,宏达,王伯荪先等.广东黑石顶常绿阔叶林生物量及其分配研究[J].植物生态学与地植物学学报,1993,17 (4) :189-198.

[58] 杨成源,张加研,李文政等.滇中高原及干热河谷薪材树种热值研究[J].西南林学院学报,1996,16 (4) :294-302.

[59] 覃先林,张子辉,易浩若等.一种预测森林可燃物含水率的方法[J].火灾科学,2001,20 (3) :160-162.

[60] 李林,金娜.几种针叶类可燃物含水率的动态研究[J].森林防火,2004, (2) :15-16.

[61] Forberg Michael A, Lancaster James W, Schroeder Mark J. Drying relation and standard and field conditions. For. Sci., 1970, 16:121-128.

- [62] Forberg Michael A. Drying rates of heartwood below fibersaturation. For. Sci, 1970, 16:57-63.
- [63] Mc Cammon, BruceP. Suonpack influences on dead fuel moisture. For.Sci, 1976, 22:323-328.
- [64] 邸雪颖, 王宏良等. 林火预测预报[M]. 哈尔滨:东北林业大学出版社, 1993.
- [65] 王得祥等. 细小可燃物含水率与气象因子关系的研究[J]. 西北林学院学报, 1996, 11 (4) :35-39.
- [66] 张景群, 王得祥. 48种乔木8种灌木燃烧性的R-A方程计算与分类[J].林业科学,1999, 35 (4) :51-56.
- [67] 王得祥等. 可燃性气体逸出率应用于树种然烧性评价的研究[J]. 西南林学院学报,1999, 19 (3) :176-181.
- [68] 王得祥等. 秦岭火地塘林区4种林分地被物林火蔓延特性研究[J]. 西北林学院学报, 2001, 16 (1) : 44-47.
- [69] 周顺亮, 刘家胜, 叶清等. 江西常见树种失水率分析[J] . 气象与减灾研究, 2007, 30 (3) :60-62.
- [70] 何忠秋等.森林可燃物含水量模型的研究[J] . 森林防火, 1995, (2): 15-16.
- [71] 刘志忠. 森林可燃物管理研究.哈尔滨[M].东北林业大学出版社, 1994.
- [72] 胡海清编著.林火与环境[M].东北林业大学出版社, 1999.
- [73] 周以良等.中国大兴安岭植被[M]. 北京科学出版社, 1991.
- [74] 邸雪颖.大兴安岭北方针叶林火生态和火历史的研究[D]. 东北林业大学博士论文, 1994.
- [75] Brown. P. M. Kaufmann.M .R . Shepper. W . D. Long-term landscape patterns of post fire events, A montane ponderos a pine forest of central Colorado.LandscapeEcology, 1999, (14) :51 3-532.
- [76] 王梅晖, 朱异平等.森林地表火行为估算的数学模型[J].火灾科学.1994, 3 (1) : 35-41.
- [77] 黄作维. 基于GIS和RS的林火行为预测研究[C]. 中南林业科技大学硕士论文, 2004.

- [78] 刘晓东, 王军, 张东升等. 大兴安岭地区兴安落叶松林可燃物模型的研究[J]. 森林防火, 1995 (3) :8-9.
- [79] 袁春明, 文定元. 马尾松人工林可燃物负荷量和烧损量的动态预测[J]. 东北林业大学学报, 2000, 28 (6) :24~27.
- [80] 邓湘雯, 聂绍元, 文定元等. 南方杉木人工林可燃物负荷量预测模型的研究[J]. 湖南林业科技. 2002, 29 (1) :24.
- [81] 张思玉, 张运生, 黎义明. 芒其马尾松林下可燃物分布及其燃烧性[J]. 森林防火, 2005, (4) :17—18.
- [82] 熊翠林, 刘桂华. 江淮丘陵地带防火树种选择[J]. 安徽农业大学学报, 2008, 35 (1) :132-135.
- [83] 王娟, 赵江平, 张俊. 我国森林火灾预测及风险分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2008, 4 (4) :41-45.
- [84] 邱雪颖. 火生态学的发展与未来展望[J]. 森林防火, 1994, 33 (2) :44-46.
- [85] 范维澄, 王清安, 张人杰等. 火灾科学导论[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1993.
- [86] Muzy A ,Wainer G. 2002. Comparing simulation methods for fire spreading across a fuel bed. In :Barros FJ, Giambiasi N, eds. Proceedings of AI, Simulation and Planning in High Autonomy Systems. AIS'2002 , 219-224. Lisbon , Portugal.
- [87] Nelson RM. 2002. An effective wind speed for models of fire spread. Int J Wildl Fire ,11 :153~161.
- [88] Tang X-Y (唐晓燕) ,Yu M-Y (孟宪宇) ,Ge H-L (葛宏立) , et al . 2003. Research on forest fire spreading simulation based on raster structure and its realization. J Beijing For Univ (北京林业大学学报) ,25 (1) :53~57 (in Chinese) .
- [89] Finney MA. 1998. Farsite: Fire area simulator-model development and evaluation. USDA Forest Service. Res Pap RMRSRP-4.
- [90] Andrews P L BEHAVE. Fire Behavior Prediction and Fuel Modeling System BURN Subsystem. Part1 .USDA Forest Service. Intermountain Forest and Range Experiment Station General Technical Report. 1986, INT-194.

- [91] Curtis.E, Woodcock.Mapping Forest Vegetation Using Landsat T M Imatery and a Canopy Rflectance Mode[J].Remote Semote Sensing, 1996 (3) :24-28.
- [92] King SA, Crawfis RA , Reid W. 1999.“Fast Animation of Amorphous and Gaseous Phenomena”. Volume Graphics '99 , Swansea, Wales. 333~346.
- [93] Wei X , Li W, Mueller K, et al . 2002. Simulating Fire with Texture Splats. 13th IEEE Visualization 2002 Conference. 227~234.
- [94] 李建微, 陈崇成, 於其之等. 虚拟森林景观中林火蔓延模型及三维可视化表达[J]. 应用生态学报, 2005,16 (5) :838-842.
- [95] 蔡道雄, 卢立华. 浅谈石漠化治理的对策及造林技术措施[J]. 世界林业研究, 2002, 15 (2) :77-79.
- [96] 官丽莉, 周小勇, 罗艳. 我国植物热值研究综述[J]. 生态学杂志, 2005, 24 (4) :452-457.
- [97] 陈崇成, 李建微, 唐丽玉等.林火蔓延的计算机模拟与可视化研究进展[J].林业科学, 2005, 41 (5) :156-162.
- [98] 袁春明, 文定元.林火行为研究概况[J]. 世界林业研究, 2000, 13 (6) :28-31.
- [99] 李世友, 杨孝淋, 李生红等. 树皮的阻燃性[J].林业科学.2009, 12 (3) :85—89.
- [100] 郭平, 康春莉, 李军等. 四种草本植物可燃物含水率在干燥过程中的变化规律[J]. 草地学报, 2003, 11 (3) :251-255.
- [101] 舒立福, 田晓瑞, 李红等.我国亚热带若干树种的抗火性研究[J]. 火灾科学, 2000, 9 (2) :1—7.
- [102] 张合平, 康文星, 田大伦等. 杉木人工林群落净初级生产的能量结构特征[J]. 中南林学院院报, 2002, 22 (2) :7-11.
- [103] 王晓晶, 张晓丽, 黄华国. DEM在林火行为模拟中的应用[J]. 林业资源管理, 2007, 1 (1) : 99-102.
- [104] 林其钊, 舒立福.林火概论.[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2003.
- [105] Stephen J P, Patrica L A, Richard D L. Introduction toWildland fire (2nd edn.) [M]. John Wiley&Son Inc, 1996.

- [106] 宋丽艳, 周国模, 汤梦平等. 基于GIS 的林火蔓延模拟的实现[J]. 浙江林学院学报, 2007, 24 (5) :614-618.
- [107] 金文斌. 长白山地被可燃物载量及林火行为研究[D]. 北京林业大学博士论文, 2010.

附录（攻读学位期间的主要学术成果）

1) 参加课题项目

序号	项目、课题名称 (下达编号)	项目课题来源、 属何种项目	起讫时间	经费 (万元)
1	国家林业局石漠化定位 监测项目（20080408）	国家林业局	2008~2010	15

2) 发表的论文

序号	论文作者	论文题目	期刊名称	发表时间 (卷次)
1	第二作者	湘西南石漠化地区 4 种植被恢 复模式早期林分燃烧性研究	林业科学	2010
2	第六作者	5 种植被恢复模式对邵阳县石 漠化土壤理化性质的影响	中南林业科 技大学学报	2010, 30 (2) :23~28

致 谢

本论文是在导师邓湘雯教授的悉心指导下完成的。从最初的选题、提纲拟定、方案设计、技术路线制定、内容修改，直至论文的最后完成，每一步都倾注了导师大量的心血！导师执着的敬业精神、严谨的治学态度以及崇高的为人风范，将使我终生受益，同时也激励我今后在科学研究的道路上不断进取和创新！

感谢所有提供支持的人，他们在数据的前期处理和在论文的研究方案和编排及论文的修改提出了许多宝贵意见，在此诚挚谢意！

感谢中南林业科技大学生态学的各位老师，他们的敬业精神和诲人不倦的育人精神深深感染了我，将激励着我为祖国的林业事业奋斗。

感谢中南林业科技大学研究生部和生命科学与技术学院的培养，感谢生态学科 2007 级同学三年来如兄弟姐妹般的关怀和帮助，也感谢学弟学妹们在试验上对我的帮助，研究生生涯将带给我美好的回忆。

感谢我的亲人三年来给予我物质和精神上的帮助和无微不至的关怀！他们给予我极大的关心、支持、督促和鼓励，使我安心学习和研究，他们是我奋发向上、顽强拼搏的动力之源！

感谢所有关心、支持和帮助过我的老师、朋友、同学！

作者：唐林琴

2010 年 4 月于中南林业科技大学

