

DOI:10.12171/j.1000-1522.20200047

基于模拟点烧不同加热时间和腐殖质粒径对 森林地下火垂直燃烧的影响

王明霞¹ 王雅钧¹ 汪凤琴¹ 高 博¹ 单延龙¹ 尹赛男¹ 季 鑫¹ 舒立福²

(1. 北华大学森林草原防火科技创新中心, 北华大学林学院, 吉林 吉林 132013;

2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘要:【目的】森林地下火是一种缓慢、无焰、持续时间长的阴燃, 对森林危害极大。大兴安岭地区是我国森林地下火频发区域, 研究不同加热时间和腐殖质粒径对地下火垂直燃烧的影响, 旨在为该地区森林地下火的预防、监测、扑救提供参考。【方法】以大兴安岭地区典型林型兴安落叶松林为研究对象, 根据室内控制模拟点烧实验数据, 使用 SPSS 进行双因素方差分析, Origin 软件绘图, 研究 3 种加热时间和 5 种腐殖质粒径对地下火垂直燃烧过程中蔓延速度和不同深度最高温度的影响。【结果】森林地下火垂直燃烧过程中, 深度 3 cm 处燃烧最高温度只受加热时间的影响且差异显著($P < 0.05$), 而腐殖质粒径对其的影响则差异不显著($P > 0.05$); 深度 6 cm 处的燃烧最高温度分别受加热时间($P < 0.05$)和腐殖质粒径($P < 0.05$)的影响; 当深度大于 6 cm 后燃烧的最高温度则只受腐殖质粒径的影响并且差异显著($P < 0.05$)。森林地下火垂直燃烧过程中的蔓延速度则只受腐殖质粒径的影响, 不同腐殖质粒径之间的蔓延速度存在显著差异($P < 0.05$)。【结论】森林地下火垂直燃烧 3 和 6 cm 处的最高温度随着加热时间的增加而升高, 加热 2 h 时的燃烧温度最高; 垂直燃烧深度 9~21 cm 时, 腐殖质粒径 40 目的燃烧温度最高; 不同腐殖质粒径对森林地下火垂直燃烧蔓延速度的影响中, 腐殖质粒径 20 目的蔓延速度是最快的; 腐殖质粒径 60 目时, 是地下火燃烧过程中的临界, 燃烧的最高温度和蔓延速度都较低。

关键词: 森林地下火; 兴安落叶松林; 加热时间; 腐殖质粒径; 模拟点烧

中图分类号: S762.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2021)03-0066-07

引文格式: 王明霞, 王雅钧, 汪凤琴, 等. 基于模拟点烧不同加热时间和腐殖质粒径对森林地下火垂直燃烧的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(3): 66-72. Wang Mingxia, Wang Yajun, Wang Fengqin, et al. Effects of different heating times and humus particle sizes on vertical combustion of forest underground fire based on simulated spot burning [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(3): 66-72.

Effects of different heating times and humus particle sizes on vertical combustion of forest underground fire based on simulated spot burning

Wang Mingxia¹ Wang Yajun¹ Wang Fengqin¹ Gao Bo¹
Shan Yanlong¹ Yin Sainan¹ Ji Xin¹ Shu Lifu²

(1. Beihua University Science and Technology Innovation Center of Wildland Fire Prevention and Control,
Forestry College of Beihua University, Jilin 132013, Jilin, China;

2. Institute of Forest Ecological Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] The combustion of underground fire is a slow, flameless, long duration smoldering, which does great harm to forest. Daxing'anling region is a frequent area of forest underground fire in

收稿日期: 2020-03-04 修回日期: 2020-03-28

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFD0600205), 国家自然科学基金项目(31971669), 北华大学研究生创新计划项目(2018-016), 北华大学大学生创新创业训练计划项目。

第一作者: 王明霞。主要研究方向: 林火生态与管理。Email: 2247329989@qq.com 地址: 132013 吉林省吉林市丰满区滨江东路 3999 号北华大学东校区林学院逸夫楼。

责任作者: 单延龙, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 林火生态与管理。Email: shanyl@163.com 地址: 同上。舒立福, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 林火管理。Email: shulif@caf.ac.cn 地址: 100091 北京市海淀区东小府 1 号中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

northeastern China. This paper aims to study the effects of different heating times and humus particle sizes on the vertical combustion of underground fires, aiming to provide a reference for the prevention, monitoring and suppression of underground fires in the area. [Method] Taking the typical forest type in the Daxing'an Mountains, i.e. *Larix gmelinii* forest as the research object, according to the indoor control simulation of scorching experiment data, SPSS was used to perform two-factor analysis of variance, and the Origin software was used to draw. The effects of three heating times and five humus particle sizes on the spreading speed and the highest temperature at different depths during the vertical combustion of underground fire were studied. [Result] During the vertical burning process of the forest underground fire, the temperature of the highest burning at a depth of 3 cm was only affected by the heating time and the difference was significant ($P < 0.05$), but the effects of humus particle size on the difference were not significant ($P > 0.05$). The highest temperature of combustion at a depth of 6 cm was affected by the heating time ($P < 0.05$) and the particle size of humus ($P < 0.05$). When the depth was greater than 6 cm, the maximum combustion temperature was only affected by the humus particle size and the difference was significant ($P < 0.05$). The spread rate during the vertical combustion of forest underground fires was only affected by the humus particle size. There were significant differences between the spreading speeds ($P < 0.05$). [Conclusion] The highest temperature of underground forest fires burning at 3 cm and 6 cm depth rises with the increase of heating time, and the burning temperature is the highest when heated for 2 h. When the vertical combustion depth is 9–21 cm, the humus particle size is 40 mesh, the burning temperature is the highest. Among the effects of humus particle size on the spread speed of forest underground fires, the spread speed of humus particle size 20 mesh is the fastest; when the humus particle size is 60 mesh, it is the criticality in the process of underground fire combustion. The highest combustion temperature and spread speed are lower.

Key words: forest underground fire; *Larix gmelinii* forest; heating time; humus particle size; simulated spot burning

火灾是森林生态系统的重要干扰因子之一, 高强度、大规模的森林火灾对景观格局和植被生长有着很大的影响^[1-2]。森林地下火是森林火灾的一种表现形式, 主要发生在林下的腐殖质层或泥炭层, 对森林危害极大^[3]。森林地下火的燃烧状态与其他有焰火灾有所不同, 是一种阴燃现象, 具有燃烧缓慢、无火焰、燃烧持续时间长等特点^[4]。由于地下火这一燃烧特征, 很难对其发生机理和发展过程等进行研究, 因此, 目前国内外学者对地下火的研究还相对较弱。Davies 等^[5]对苏格兰地区一处泥炭地发生地下火后造成的碳损失进行了研究, 结果表明这场燃烧了1个多月的地下火共燃烧了 (396 ± 63) t 的碳, 相当于英国泥炭地每年固碳总量的0.1%~0.3%。Huang 等^[6]通过模拟点烧实验研究了地下火上下蔓延的特征, 结果表明地下火向上蔓延的速度要比向下蔓延的快。Reardon 等^[7]研究了可燃物含水率和有机质含量对地下火发生概率的影响, 指出地下火发生概率与有机质含量成正比, 与含水率成反比。唐抒圆等^[8]归纳总结了森林地下火特征, 并提出了构建“空中-地面-地下”的防控措施。何诚等^[9]对大兴安岭森林草原地下火阴燃特征进行了研究,

指出随着可燃物载量的增加, 燃烧所释放的热量增加, 达到最高温度时间缩短。尹赛男等^[10]通过室内模拟点烧实验, 指出地下火垂直燃烧的最高温度和蔓延速度与燃烧深度呈现正向线性相关关系。辛颖等^[11]开展了腐殖质阴燃向明火转变的研究, 空气流速越大, 阴燃传播速率越大, 转变为明火的时间越短。森林腐殖质含水率大于20%时, 阴燃不能产生明火。

近几年来, 由于全球气温的不断升高, 导致北方林区气候偏旱, 林地地温偏高, 森林地下火有增长的趋势^[12]。大兴安岭地区是我国森林地下火的频发区域之一^[13], 因此, 对该地区森林地下火的发生机理、燃烧特征、影响因素等展开科学研究就显得十分迫切。森林地下火单独发生的几率很小, 大多是伴随着地表火同时发生, 并且由于地下火具有极强的隐蔽性, 当地表火扑灭后地下火还会继续燃烧蔓延。在这个过程中地表火就相当于引起地下火发生的火源, 所以地表火的火强度或持续时间将对地下火的燃烧特征有很大的影响。地下火燃烧过程中氧气含量起着至关重要的作用^[14], 而可燃物的粒径大小则直接影响氧气含量。本研究以大兴安岭地区人工兴

安落叶松林为研究对象,通过室内控制模拟点烧实验,研究不同加热时间和腐殖质粒径对地下火垂直燃烧的影响,旨在为该地区森林地下火的预防、监测、扑救提供坚实的理论依据。

1 研究区概况

大兴安岭林区是我国最靠北,面积最大的一个林区,也是我国少有的原始林区之一。全区南北向的距离超过东西向,且北宽南窄。该地区属于寒带针叶林区,土壤主要有棕色针叶林土、暗棕壤、灰色森林土、草甸土、沼泽土和冲积土等^[15-17]。本研究区域为大兴安岭地区加格达奇森林技术推广站(50°20′~50°23′N、123°57′~124°00′E),该地位于大兴安岭东坡,加格达奇区以南 15 km 处。气候属寒温带大陆性气候,无霜期短,冬季漫长寒冷,年平均气温-1~2℃,年有效积温 1 800~2 000℃,无霜期 90~120 d,年平均降雨量为 450~500 mm。全站总施业面积为

7 326 hm²,主要树种包括兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)、柞树(*Quercus mongolica*)等^[10]。

2 研究材料与方法

2.1 野外调查

2019 年春季防火期前往大兴安岭地区加格达奇森林技术推广站进行野外调查。在兴安落叶松林下随机选取 3 块 30 m×20 m 的实验样地,同时记录样地的经纬度、海拔、林龄等基本信息(样地基本信息见表 1)。在森林可燃物的调查中,通常是在样地对角线处进行调查和取样^[15,18]。所以本研究在每块样地的对角线处各选取 3 块 50 cm×50 cm 的小样方,去除地表的凋落物层和半分解层,并测量腐殖质(土壤 A 层)厚度^[19],之后采集小样方内的所有腐殖质带回实验室。

表 1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of sample plots

样地 Sample plot	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Altitude/m	郁闭度 Canopy density	林龄/a Forest age/year	腐殖质层厚度 Humus thickness/cm
样地1 Sample plot 1	50°18'23"N 124°05'27"E	392.9	0.8	27	31
样地2 Sample plot 2	50°17'56"N 124°05'17"E	407.2	0.7	30	34
样地3 Sample plot 3	50°17'50"N 124°53'56"E	422.6	0.8	27	36

2.2 样品处理

首先将采集回的腐殖质置于鼓风干燥箱内,105℃连续烘干 48 h 使腐殖质趋于绝干。之后将腐殖质中较大的枯枝落叶和树根挑出,使用中药粉碎机将腐殖质打碎。最后使用筛子分别筛选小于 20、40、60、80 和 100 目粒径的腐殖质用于地下火垂直燃烧实验。

2.3 地下火垂直燃烧实验

使用自行组装的地下火温度采集系统监测整个地下火垂直燃烧过程,该系统包括:阴燃反应炉(材料为硅酸铝陶瓷纤维,具有很好的保温隔热效果)、K 型热电偶(长 300 mm)、数据采集装置(8 通道)、笔记本电脑(Labview 软件,数据采集频率 10 s 1 次)。将不同粒径质量约为 2 kg 的腐殖质置于阴燃反应炉中,并在侧面每隔 3 mm 打一个小孔,将热电偶插入孔中,使用补偿导线连接热电偶和数据采集模块,最后通过数据采集模块将燃烧过程中的温度变化数据传回笔记本电脑。本实验的引燃装置采用远红外加热板,使用前先将加热板预热 2 h 使其达到最高温度(远红外加热板最高温度稳定为 400~450℃)之后对腐殖质进行加热。为探究不同加热时间和腐殖质粒径对地下火垂直燃烧的影响,本研究在每个腐殖

质粒径下分别设置 3 个梯度的加热时间。在正式实验之前进行了多次预实验,发现当加热时间为 50 min~1 h 时不同粒径的腐殖质可以自我维持燃烧。所以确定 1 h 为起始加热时间,并以 0.5 h 为步长设置了 3 个加热梯度,分别为加热 1、1.5、2 h,每组实验重复 2 次。

2.4 数据处理与分析

使用 SPSS19.0 完成不同加热时间和腐殖质粒径对地下火垂直燃烧过程中最高温度和蔓延速度影响的双因素方差分析,使用 Origin 软件绘制多重比较结果的柱状图。

3 结果与分析

3.1 不同加热时间和腐殖质粒径对地下火垂直燃烧最高温度的影响

地下火垂直燃烧过程中,不同深度燃烧最高温度之间变化较大,所以分别对不同深度的地下火燃烧最高温度进行不同加热时间和腐殖质粒径影响的双因素方差分析。

由表 2 可知,在地下火垂直燃烧的过程中,不同加热时间和腐殖质粒径对不同燃烧深度最高温度的影响存在显著差异。其中当深度为 3 cm 时不同加热

表2 不同加热时间和腐殖质粒径对不同深度最高温度影响的方差检验

Tab. 2 Variance test of the effects of different heating times and humus particle sizes on the highest temperature at different depths

距离 Distance	指标 Index	<i>F</i>	<i>P</i>
D1	腐殖质粒径 Humus particle size	1.855	0.171
	加热时间 Heating time	22.984	0.000
	腐殖质粒径 × 加热时间 Humus particle size × heating time	0.535	0.813
D2	腐殖质粒径 Humus particle size	3.896	0.023
	加热时间 Heating time	6.950	0.007
	腐殖质粒径 × 加热时间 Humus particle size × heating time	0.292	0.958
D3	腐殖质粒径 Humus particle size	4.846	0.010
	加热时间 Heating time	3.402	0.060
	腐殖质粒径 × 加热时间 Humus particle size × heating time	0.490	0.845
D4	腐殖质粒径 Humus particle size	4.109	0.019
	加热时间 Heating time	1.720	0.213
	腐殖质粒径 × 加热时间 Humus particle size × heating time	0.523	0.821
D5	腐殖质粒径 Humus particle size	4.895	0.010
	加热时间 Heating time	1.136	0.347
	腐殖质粒径 × 加热时间 Humus particle size × heating time	0.379	0.915
D6	腐殖质粒径 Humus particle size	4.665	0.012
	加热时间 Heating time	0.759	0.486
	腐殖质粒径 × 加热时间 Humus particle size × heating time	0.326	0.943
D7	腐殖质粒径 Humus particle size	5.355	0.007
	加热时间 Heating time	0.615	0.554
	腐殖质粒径 × 加热时间 Humus particle size × heating time	0.430	0.885

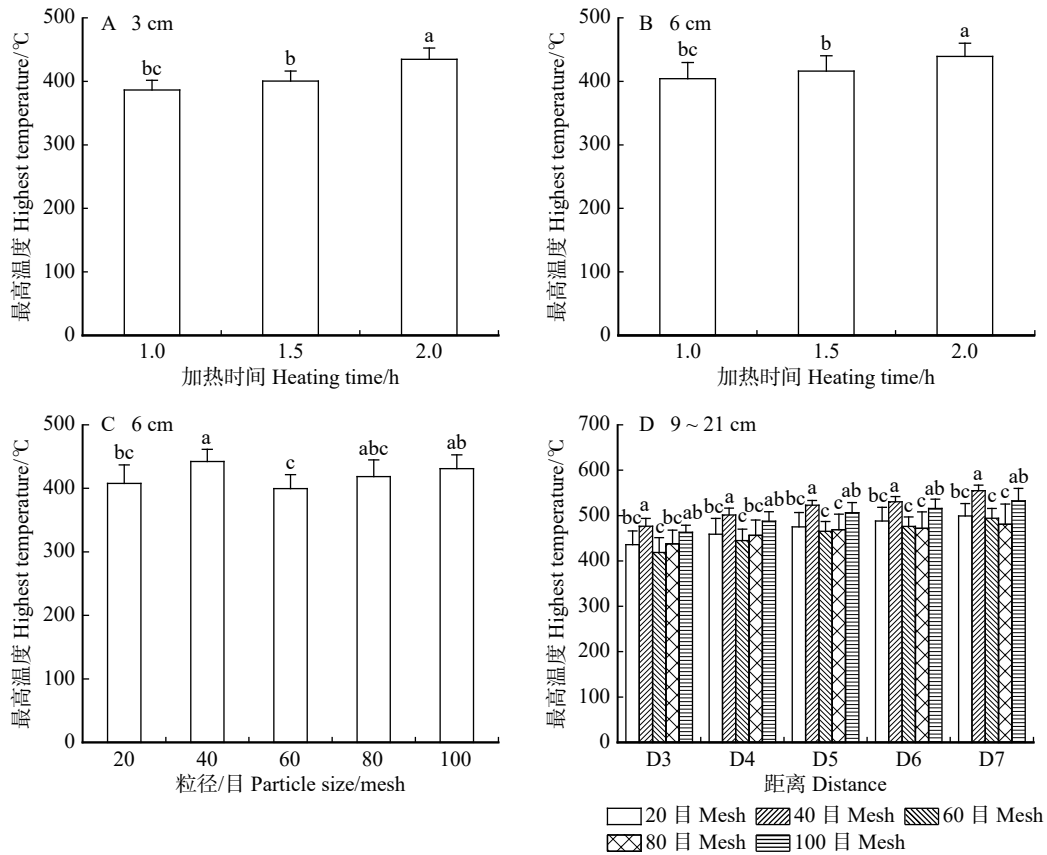
注: D1~D7表示地下火垂直燃烧深度, 分别为3、6、9、12、15、18、21 cm。下同。Notes: D1-D7 indicate the vertical combustion depth of underground fire, which are 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 cm. The same below.

时间之间存在显著差异($P = 0.000 < 0.05$), 燃烧的最高温度只受加热时间的影响; 深度为6 cm时不同粒径($P = 0.023 < 0.05$)和不同加热时间($P = 0.007 < 0.05$)之间存在显著差异, 燃烧的最高温度受腐殖质粒径和加热时间影响, 但是二者的交互作用并没有显著差异; 当燃烧深度大于6 cm时, 地下火垂直燃烧的最高温度与加热时间无关, 但不同深度的最高温度在腐殖质粒径上皆存在显著差异($P_{(D3)} = 0.010 < 0.05$ 、 $P_{(D4)} = 0.019 < 0.05$ 、 $P_{(D5)} = 0.010 < 0.05$ 、 $P_{(D6)} = 0.012 < 0.05$ 、 $P_{(D7)} = 0.007 < 0.05$)。

随着加热时间的增加, 地下火垂直燃烧3 cm处最高温度也随之增加。当加热时间为2 h时, 地下火垂直燃烧3 cm深度处的最高温度最高, 为434.74℃, 分别与加热时间为1.5和1 h时的最高温度存在显著差异。加热时间为1.5和1 h时, 3 cm处的最高温度分别为400.52和386.37℃, 并且二者之间不存在显著差异(图1A)。地下火垂直燃烧6 cm处最高温度也是随着加热时间的增加而升高, 其中加热时间为2 h时最高温度最高, 为439.25℃, 分别与加热时

间为1.5 h(最高温度416.16℃)和1 h(最高温度404.24℃)存在显著差异(图1B)。6 cm处的最高温度同时也受粒径大小的影响, 当腐殖质粒径40目时最高温度最大, 为442.38℃, 其次是100目(最高温度431.02℃)、80目(最高温度418.45℃)、20目(最高温度407.87℃)。当粒径60目时温度较低, 为399.70℃, 与40目、100目时最高温度之间皆存在显著差异(图1C)。

地下火垂直燃烧深度9~21 cm时, 最高温度只受腐殖质粒径的影响。从图中可以看出, 当腐殖质粒径40目时不同深度的最高温度都最高($D3 = 476.60$ ℃、 $D4 = 501.25$ ℃、 $D5 = 522.77$ ℃、 $D6 = 530.37$ ℃、 $D7 = 554.72$ ℃), 并且与腐殖质粒径20目、60目、80目时的最高温度存在显著差异, 与100目无显著差异。其次是粒径100目时D3~D7最高温度分别为463.23、487.58、506.47、515.75、532.62℃, 当燃烧深度为D3和D4时与60目的最高温度存在显著差异, 燃烧深度为D5、D6、D7时分别与60目和80目时的最高温度存在显著差异。之后是腐殖质



各图数据条上相同的字母表明二者之间差异不显著($P > 0.05$)。下同。Same letters on the data bars of each figure proves that difference between the two is not significant ($P > 0.05$). The same below.

图 1 不同加热时间和腐殖质粒径下地下火垂直燃烧不同深度最高温度的多重比较

Fig. 1 Multiple comparisons of the highest temperature of vertical combustion of underground fires at different heating times and humus particle sizes

粒径 20 目, 腐殖质粒径 60 目和 80 目时垂直燃烧的温度最低(图 1D), 尤其是腐殖质粒径 60 目时, 在整个地下火垂直燃烧过程中平均温度也是最低的, 为 449.54 °C。

3.2 不同加热时间和腐殖质粒径对地下火垂直燃烧蔓延速度的影响

地下火燃烧速度缓慢, 不同深度之间相差不大, 因此本研究在不同加热时间和腐殖质粒径对蔓延速度影响的双因素方差分析中, 蔓延速度的值为整个地下火垂直燃烧过程中的蔓延速度。由表 3 可知, 不同腐殖质粒径下的蔓延速度之间存在显著差异 ($P = 0.001 < 0.05$), 不同加热时间下蔓延速度之间差

异不显著($P = 0.134 > 0.05$), 二者之间的交互作用差异也不显著($P = 0.586 > 0.05$)。说明地下火垂直燃烧过程中的蔓延速度仅受腐殖质粒径的影响, 加热时间对蔓延速度没有影响。

由图 2 可知, 腐殖质粒径 20 目时地下火垂直燃烧的蔓延速度最快为 1.48 cm/h, 与腐殖质粒径 60 目、80 目、100 目时的蔓延速度之间存在显著差异。腐殖质粒径 40 目时的蔓延速度仅次于粒径 20 目, 为 1.42 cm/h, 与腐殖质粒径 60 目和 100 目时

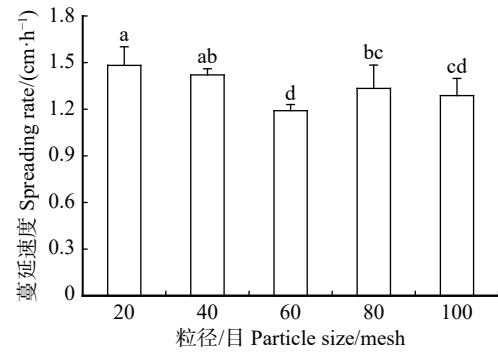


图 2 不同腐殖质粒径下地下火垂直燃烧蔓延速度的多重比较

Fig. 2 Multiple comparison of vertical combustion spreading velocity of underground fire under different humus particle sizes

表 3 不同加热时间和腐殖质粒径对蔓延速度影响的方差检验

Tab. 3 Variance test of the impact of different heating times and particle sizes on spreading rate

指标 Index	F	P
腐殖质粒径 Humus particle size	7.624	0.001
加热时间 Heating time	2.300	0.134
腐殖质粒径 × 加热时间 Humus particle size × heating time	0.835	0.586

的蔓延速度存在显著差异。腐殖质粒径 80 目时蔓延速度为 1.33 cm/h, 与腐殖质粒径 60 目时的蔓延速度存在显著差异。腐殖质粒径 100 目和 60 目时的蔓延速度最慢, 分别为 1.29 和 1.19 cm/h。

4 结论与讨论

森林地下火是一个隐蔽、漫长的阴燃过程, 不同于地表火和树冠火易于直接观测^[20], 在预防和扑救过程中存在很大的危险和困难。本研究通过室内控制模拟点烧实验, 研究 5 种粒径和 3 种加热时间条件对地下火垂直燃烧过程中最高温度和蔓延速度的影响, 结果表明不同加热时间和腐殖质粒径对地下火燃烧过程中的最高温度和蔓延速度有影响, 这与一些学者的研究结论相符^[14,21-23]。通过双因素方差分析结果可以发现, 当地下火燃烧深度浅时, 最高温度只受加热时间的影响, 且加热时间越长, 燃烧温度越高。随着燃烧深度的增加, 燃烧的最高温度则仅受腐殖质粒径的影响, 且在任何深度下腐殖质粒径 40 目时燃烧的温度都最高。火源是森林燃烧三要素之一^[24], 在本研究中加热板就相当于火源, 地下火燃烧过程中近表层的可燃物距离火源近, 所以燃烧温度只受加热时间的影响。当撤掉加热板之后, 整个地下火的燃烧过程就要靠自身所释放的热量去维持^[25], 而热量释放的快慢则取决于可燃物之间的空隙, 因此燃烧深度越大, 燃烧的最高温度只受腐殖质粒径的影响。

通过对地下火垂直燃烧过程蔓延速度的分析可知, 地下火垂直燃烧蔓延的快慢只受腐殖质粒径影响, 加热时间对蔓延速度没有影响, 且当腐殖质粒径 20 目时蔓延速度最快, 其次是腐殖质粒径 40 目。森林地下火的燃烧是一个氧化还原反应的过程, 氧气含量直接决定整个反应的快慢^[26]。腐殖质粒径 20 目时, 腐殖质之间的孔隙度最大, 氧气含量最多, 所以氧化还原反应更充分, 燃烧的蔓延速度也就越快。在整个实验过程中发现, 无论是不同深度燃烧的最高温度还是蔓延速度, 腐殖质粒径 60 目时都是较低的。森林的燃烧除了火源之外可燃物和氧气也是必不可少的, 当腐殖质粒径 20 目和 40 目时, 腐殖质之间的空隙大、氧气含量高, 所以燃烧充分; 当腐殖质粒径 80 目和 100 目时, 虽然可燃物之间的氧气含量变少了, 但是可燃物丰富, 燃烧释放的热量多。所以腐殖质粒径 60 目时为地下火垂直燃烧的临界, 即氧气含量低、可燃物少导致燃烧不充分, 者香等^[22]在研究中也曾指出地下火燃烧过程中是存在腐殖质粒径的临界点, 这与本研究的结论相符。地下火燃烧过程中不仅受腐殖质粒径和加热时间的影响, 还

受含水率、有机质含量等因素影响, 所以接下来作者将对含水率、有机质含量等条件对地下火燃烧的影响展开一系列研究。

根据相关研究结果针对地下火的预防、监测、扑救提出以下建议: 当地表火发生时并持续时间较长时, 一定要注意伴随森林地下火的发生, 当近地表的地下可燃物温度达到 400 ℃ 以上时, 森林地下火很可能已经发生, 所以在扑救过程中应该及时挖掘防火沟用来防止地下火的蔓延。地下可燃物粒径近似 20 目或 40 目的林型要重点防范森林地下火的发生, 且一旦发生火灾一定要尽早尽快进行扑救, 这两种粒径条件下地下火燃烧温度高、蔓延速度快, 若不及时扑救将会给扑救人员和森林生态系统带来极大的危害。地下可燃物粒径近似 60 目时, 发生的地下火燃烧温度低、蔓延速度慢, 所以针对该种情况要加大火场看守力度、增加看守时间, 防止发生复燃现象。地下火燃烧是一个极其复杂的过程, 影响因素众多, 火行为特征难以监测, 所以控制模拟点烧实验是对地下火展开研究的重要手段。虽然本研究的实验过程与实际情况存在差异, 但从实验样地的选取、到腐殖质的处理以及点烧实验的设计等都具有较高的科学性, 因此相关研究成果可以作为实际地下火燃烧过程中监测和扑救的参考依据。

参 考 文 献

- [1] Samira O, Laure P, Hugo A, et al. Burning potential of fire refuges in the boreal mixedwood forest[J]. *Forests*, 2016, 7(12): 2-17.
- [2] Suresh B K V, Roy A, Prasad P R. Forest fire risk modeling in Uttarakhand Himalaya using TERRA satellite datasets[J]. *European Journal of Remote Sensing*, 2016, 49: 389-395.
- [3] Turetsky M R, Benscoter B, Page S, et al. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 8(1): 11-14.
- [4] Rein G, Cleaver N, Ashton C, et al. The severity of smouldering peat fires and damage to the forest soil[J]. *Catena*, 2008, 74(3): 304-309.
- [5] Davies G M, Gray A, Rein G, et al. Peat consumption and carbon loss due to smouldering wildfire in a temperate peatland[J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, 308(7): 169-177.
- [6] Huang X Y, Rein G. Upward-and-downward spread of smoldering peat fire[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2018, 21: 9-17.
- [7] Reardon J, Hungerford R, Ryan K. Factors affecting sustained smouldering in organic soils from pocosin and pond pine woodland wetlands[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, 16(1): 107-118.
- [8] 唐抒圆, 李华, 单延龙, 等. 森林地下火特征及防控措施[J]. *世界林业研究*, 2019, 32(3): 42-48.

- Tang S Y, Li H, Shan Y L, et al. Characteristics and control of underground forest fire[J]. *World Forestry Research*, 2019, 32(3): 42-48.
- [9] 何诚, 舒立福, 张思玉, 等. 大兴安岭森林草原地下火阴燃特征研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2020, 40(2): 103-110.
- He C, Shu L F, Zhang S Y, et al. Research on underground fire smouldering characteristics of forest steppe in Great Xing'an Mountains in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences)*, 2020, 40(2): 103-110.
- [10] 尹赛男, 单延龙, 宋光辉, 等. 不同粒径腐殖质火垂直燃烧特征研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(10): 95-101.
- Yin S N, Shan Y L, Song G H, et al. Study on vertical combustion characteristics of humus fire under different particle sizes[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, 39(10): 95-101.
- [11] 辛颖, 王新然, 李禹洁. 森林腐殖质阴燃向明火转变实验研究[J]. *消防科学与技术*, 2018, 37(9): 1162-1166.
- Xin Y, Wang X R, Li Y J. Experimental study on the transition of forest humus from smoldering to open flame[J]. *Fire Science and Technology*, 2018, 37(9): 1162-1166.
- [12] Anderson J A R. Observations on climatic damage in peat swamp forest in Sarawak[J]. *Commonwealth Forestry Review*, 1964, 43(2): 145-158.
- [13] 舒立福, 王明玉, 田晓瑞, 等. 大兴安岭林区地下火形成火环境研究[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(4): 62-67.
- Shu L F, Wang M Y, Tian X R, et al. Fire environment mechanism of ground fire formation in Daxing'an Mountains[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(4): 62-67.
- [14] Hadden R M, Rein G, Belcher C M. Study of the competing chemical reactions in the initiation and spread of smoldering combustion in peat[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 2547-2553.
- [15] 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, 2003.
- Shan Y L. Study on forest fuel of Daxing'an Mountains in northeast China[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2003.
- [16] 张运林, 孙萍, 胡海清, 等. 风速对蒙古栎阔叶床层两个重要失水时间的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(4): 65-71.
- Zhang Y L, Sun P, Hu H Q, et al. Effects of wind speed on two key drying times of fuel beds composed of Mongolian oak leaves[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2018, 38(4): 65-71.
- [17] 张恒, 金森, 张运林, 等. 气象法预测盘古林场可燃物含水率的外推精度[J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(12): 61-67.
- Zhang H, Jin S, Zhang Y L, et al. Meteorological elements regression method is used to predict Pangu Forest Farm extrapolation accuracy analysis of fuel moisture content[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2016, 36(12): 61-67.
- [18] 满子源, 胡海清, 张运林, 等. 帽儿山地区典型地表可燃物含水率动态变化及预测模型[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(3): 49-57.
- Man Z Y, Hu H Q, Zhang Y L, et al. Dynamic change and prediction model of moisture content of surface fuel in Maoer Mountain of northeastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(3): 49-57.
- [19] 孙向阳. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
- Sun X Y. Soil science[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.
- [20] 张吉利, 邸雪颖. 地下火及阴燃研究进展[J]. *温带林业研究*, 2018, 1(3): 19-22.
- Zhang J L, Di X Y. The study of ground fire and smoldering: a review[J]. *Journal of Temperate Forestry Research*, 2018, 1(3): 19-22.
- [21] 辛颖, 历美岑. 粒径对森林腐殖质阴燃传播的影响[J]. *消防科学与技术*, 2017, 36(8): 1037-1040.
- Xin Y, Li M C. The influence of particle size on smoldering combustion of forest humus[J]. *Fire Science and Technology*, 2017, 36(8): 1037-1040.
- [22] 者香, 赵伟涛, 陈海翔, 等. 泥炭粒径对阴燃蔓延速率影响的实验研究[J]. *火灾科学*, 2014, 23(3): 129-135.
- Zhe X, Zhao W T, Chen H X, et al. Influence of particle size on the spreading rate of peat smoldering: an experimental study[J]. *Fire Safety Science*, 2014, 23(3): 129-135.
- [23] He F, Yi W, Li Y, et al. Effects of fuel properties on the natural downward smoldering of piled biomass powder: experimental investigation[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2014, 67: 288-296.
- [24] 李小川, 李兴伟, 王振师, 等. 广东森林火灾的火源特点分析[J]. *中南林业科技大学学报*, 2008, 28(1): 89-92.
- Li X C, Li X W, Wang Z S, et al. Analysis of fire source characteristics of Guangdong forest fires[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2008, 28(1): 89-92.
- [25] Ohlemiller T J. Modeling of smoldering combustion propagation[J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 1985, 11(4): 277-310.
- [26] 者香. 泥炭粒径、含水率和无机物含量对阴燃蔓延速率影响的实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
- Zhe X. Experimental study on the influence of particle size, moisture content and mineral content on the spreading rate of peat smoldering[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.

(责任编辑 赵 勃

责任编辑 刘晓东)