

DOI: 10.5846/stxb202107041776

高博,尹赛男,韩喜越,单延龙,张国将,于渤,姜禹森,王明霞.腐殖质粒径和燃烧深度对兴安落叶松人工林地下火燃烧温度的影响.生态学报, 2022,42(17):7234-7243.

Gao B, Yin S N, Han X Y, Shan Y L, Zhang G J, Yu B, Jiang Y S, Wang M X. Effects of humus particle and combustion depth on combustion temperature of underground fires in *Larix gmelinii* plantations. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 7234-7243.

腐殖质粒径和燃烧深度对兴安落叶松人工林地下火燃烧温度的影响

高 博,尹赛男,韩喜越,单延龙*,张国将,于 渤,姜禹森,王明霞

北华大学林学院,吉林 132013

摘要:地下火是森林中难以控制的一种燃烧现象,对森林危害极大,燃烧所释放的温度影响着地下火蔓延。以我国地下火频发区域之一的大兴安岭地区兴安落叶松(*Larix gmelinii*)人工林为研究对象,通过室内控制模拟点烧实验的方法,研究腐殖质粒径和燃烧深度对地下火燃烧温度的影响。结果表明:在不同地类条件下,不同粒径腐殖质和深度对燃烧最高温度的影响存在显著差异($P<0.05$);在不同深度条件下,不同地类和腐殖质粒径以及二者的交互作用对燃烧最高温度的影响均存在显著差异($P<0.05$);在 5 种地类的腐殖质中都以粒径 ≤ 80 目和深度 12cm 处的燃烧温度最高;塔头甸子和水湿地条件下的地下火燃烧温度较高,尤其是塔头甸子;深度、距离和腐殖质粒径可作为有坡山地、水湿地和农用地条件下预测模型自变量,深度和腐殖质粒径可作为塔头甸子和无坡山地条件下预测模型自变量,且模型均通过了显著性检验($P<0.05$)。相关研究成果可以为该地区地下火的防控和扑火装备的研发提供科学依据。

关键词:森林地下火;腐殖质;兴安落叶松人工林;燃烧温度;预测模型

Effects of humus particle and combustion depth on combustion temperature of underground fires in *Larix gmelinii* plantations

GAO Bo, YIN Sainan, HAN Xiyue, SHAN Yanlong*, ZHANG Guojiang, YU Bo, JIANG Yusen, WANG Mingxia
Forestry College of Beihua University, Jilin 132013, China

Abstract: Underground fire is a kind of burning phenomenon which is difficult to control in the forest. It is very harmful to the forest. The temperature released by burning affects the spread of underground fire. Taking *Larix gmelinii* plantation in Daxing'anling area, one of the areas with frequent underground fire in China, as the research object, effects of humus particle size and combustion depth on the combustion temperature of underground fires were studied by the indoor control simulation of scorching experiment data. There were significant differences in the effects of different particle sizes and depths of humus on the maximum combustion temperature under different land classifications ($P<0.05$); there were significant differences in the effects of different land classifications, particle sizes of humus and their interaction on the maximum combustion temperature under different depths ($P<0.05$). Among five types of humus, the highest combustion temperature was at the particle size ≤ 80 mesh and the depth of 12 cm. The combustion temperature of underground fire was higher under the condition of tatoudianzi and meadow bog, especially in tatoudianzi. Depth, distance and humus particle size could be used as independent variables of the prediction model under the conditions of slope mountains, meadow bog and agricultural land, while depth and humus particle size could be used as independent variables of the prediction model under

基金项目:国家自然科学基金项目(31971669);北华大学研究生创新计划项目(2021-013)

收稿日期:2021-07-04; 采用日期:2021-12-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shanyl@163.com

the conditions of tatoudianzi and flat mountains, and all the models passed the significance test ($P < 0.05$). The results can provide scientific basis for the prevention and control of underground fire and the development of fire fighting equipment in this area.

Key Words: forest underground fire; humus; *Larix gmelinii* plantation; combustion temperature; prediction model

地下火是发生在地表以下的一种低温、无焰、燃烧缓慢的阴燃现象,虽然发生次数较少,但是一旦发生将严重破坏生态系统和景观格局^[1-2]。地下火燃烧不仅会损害植物根系,对植物造成致命伤害^[3];还会消耗土壤有机碳,破坏土壤结构,改变土壤成分,造成地面坍塌^[4-6];同时释放出大量有害性气体和颗粒物,严重污染大气环境^[7-8]。在一定条件下,当地下火阴燃达到一定温度后,就可能转变成明火,引发地表火甚至树冠火,对森林造成二次损伤,同时还严重威胁扑救人员的人身安全^[9-10]。如何科学有效地防控这一危害严重的森林火灾一直困扰着森林防火工组人员。森林群落中土壤有机碳存在空间异质性^[11],不同地下可燃物的燃烧特征也存在一定差异^[12],再加上地下火自身极强的隐蔽性,扑火人员很难确定其燃烧情况,贸然进入火场具有极高的风险性。

目前,国外关于地下火的研究主要集中在泥炭火,对腐殖质层地下火的研究较少;而国内对地下火的研究仍处于探索阶段,相关研究多以单一可燃物为研究对象,对不同类型可燃物的研究鲜有报道^[13-15]。Huang 等^[16]研究了泥炭火的垂直蔓延,发现阴燃蔓延受氧气含量的影响,氧气浓度越大蔓延速度越快;Palamba 等^[17]对巴布亚和南苏门答腊的泥炭样品进行了模拟点烧实验,发现两种样品燃烧温度约 600℃,蔓延速度为 4.50—4.75 cm/h;Reardon 等^[18]发现含水率和矿物质含量对泥炭阴燃的持续燃烧存在影响,并基于 Logistics 方程建立了不同含水率和矿物质含量下阴燃持续燃烧概率的预测模型;何诚等^[13]通过模拟点烧实验发现大兴安岭地区半分解层和腐殖质层的点着温度分别为 405℃ 和 525℃,阴燃最高温度可达 690℃;者香^[19]研究发现不同条件下泥炭的燃烧温度存在差异,峰值温度在 510—720℃ 之间,峰值温度随泥炭粒径的增大而减小。尹赛男等^[20]通过对腐殖质层的模拟点烧实验发现,地下火阴燃的最高温度与燃烧深度存在正向线性关系,并拟合了地下火燃烧深度与最高温度的线性方程。

地下火的阴燃与其他林火蔓延方式不同,既能水平方向蔓延,也能垂直方向蔓延^[21],且阴燃本身是一个氧化还原反应过程,燃烧所释放的温度影响着阴燃的蔓延^[22]。本研究以我国地下火频发区域之一的大兴安岭地区为研究对象,在前文地下火阴燃温度特征研究的基础上^[23],考虑地下火水平蔓延的影响,进一步研究了兴安落叶松(*Larix gmelinii*)人工林地下火燃烧温度影响因素和温度预测,这将对该地区地下火的预防、监测、扑救以及保护一线扑火人员的生命安全具有重要意义,同时还能够为扑火装备的研发提供重要的数据支撑。

1 研究区概况

大兴安岭林区是我国保存较完好、面积最大的原始森林,全长 1400 多 km,均宽约 200 km,海拔 1100—1400 m,总面积 32.72 万 km²,其中黑龙江省境内 8.48 万 km²。本研究区域位于加格达奇森林经营技术推广站(123°45′—124°26′E,50°09′—50°35′N),该地区属于寒温带大陆性季风气候,冬季漫长高寒,夏季短暂温凉,春秋分明少雨,多高火险天气,年平均气温-2.6℃,最低温度-52.3℃,年降水量 450—500mm,全年无霜期 80—110d^[24]。植被以山地寒温带针叶林为主,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*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)等^[25],其中兴安落叶松为该地区主要优势建群种^[26]。

2 材料与方法

2.1 实验样品的采集与处理

于 2018 年春季防火期前往大兴安岭地区加格达奇进行野外调查,在该地区 5 种地类下分别选取 3 块

30m×20m 兴安落叶松人工林作为实验样地,并记录样地的基本信息(表 1)。采用尹赛男^[27]的研究方法采集腐殖质带回实验室,并进行预处理。实验前对腐殖质进行烘干处理,烘干温度为 105℃,烘干时间为 48h。本研究将烘干后的腐殖质通过中药粉碎机进行粉碎处理后过筛。在每种地类下分别设置了 4 个粒径(≤20 目、≤40 目、≤60 目、≤80 目),然后进行模拟点烧实验。

表 1 样地基本信息

Table 1 Basic information of sample plots

地类 Land classification	海拔 Altitude/m	经纬度 Latitude and longitude	胸径 DBH/cm	年龄 Age/a	郁闭度 Crown density
有坡山地 Slope mountains	566.0	124.04°E, 50.34°N	22.4	22	0.7
塔头甸子 Tatuodianzi	406.3	124.09°E, 50.32°N	22.5	27	0.5
水湿地 Meadow bog	379.7	124.11°E, 50.30°N	21.2	26	0.8
无坡山地 Flat mountains	407.2	124.08°E, 50.30°N	20.6	28	0.8
农用地 Agricultural land	553.8	124.02°E, 50.35°N	14.8	16	0.7

2.2 森林地下火模拟点烧实验

本实验使用尹赛男^[27]硕士论文中自行组装的地下火温度采集系统(图 1)。该系统包括阴燃反应炉、K 型热电偶、数据采集模块、笔记本电脑、远红外加热板、补偿导线等。

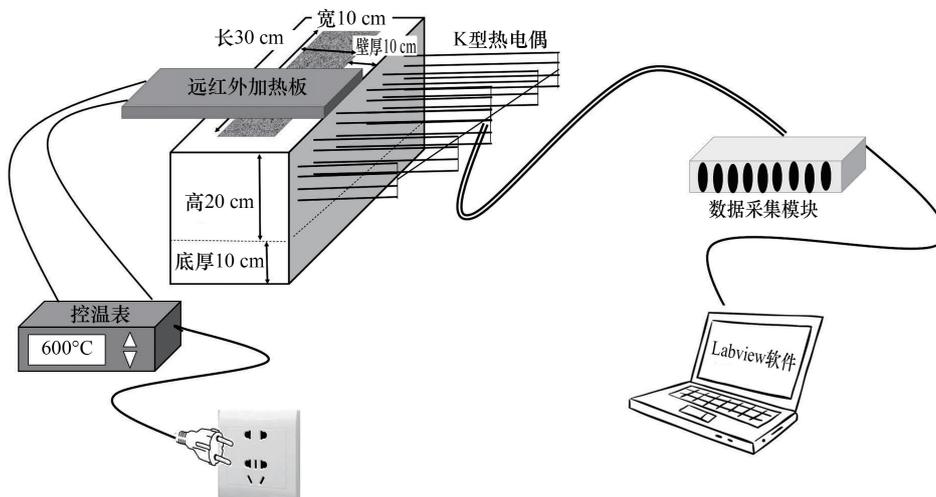


图 1 模拟燃烧实验装置

Fig.1 Experimental apparatus for simulated combustion

2.3 数据处理与分析

使用 Excel 软件整理地下火阴燃温度变化数据,为减少远红外加热板对实验结果的影响,水平方向的数据从第 3 根热电偶开始记录,垂直方向自上向下记为垂直蔓延深度(下文记作深度),水平方向上从左至右记为水平蔓延距离(下文记作距离);使用 SPSS 软件进行方差分析和逐步回归分析;使用 Origin 软件绘制箱式图,其中箱体为数据的 25—75%,上下延长线为数据的最大值和最小值,箱体上存在任意一个相同的字母说明二者之间差异不显著。

3 结果与分析

3.1 不同地类的不同粒径腐殖质和深度对地下火燃烧最高温度的影响

根据方差分析结果可知,不同地类条件下不同粒径腐殖质和深度的地下火燃烧最高温度之间均存在极显著差异($P < 0.01$);其中塔头甸子条件下二者之间交互作用存在极显著差异($P < 0.01$),需进行简单效应分析,

而其他 4 种地类条件下二者之间交互作用则差异不显著 ($P>0.05$)。通过简单效应分析可知,塔头甸子的不同粒径腐殖质条件下不同深度的燃烧最高温度之间均存在显著差异 ($P<0.05$),但是在不同深度条件下不同粒径腐殖质之间无显著差异 ($P>0.05$)。

由图 2 可知,有坡山地腐殖质粒径 ≤ 80 目时燃烧的温度最高 (492.45°C),与粒径 ≤ 20 目 (463.33°C) 和 ≤ 60 目 (446.27°C) 之间不存在差异;粒径 ≤ 40 目的温度最低 (427.74°C),与其它 3 种粒径之间都存在差异。无坡山地条件下的腐殖质粒径 ≤ 80 目时燃烧的温度最高 (401.15°C),与其它几种粒径之间都存在显著差异;其次是粒径 ≤ 20 目时 (332.01°C),与 ≤ 40 目之间存在显著差异;粒径 ≤ 40 目燃烧温度最低 (272.46°C)。农用地在腐殖质粒径 ≤ 20 目时燃烧温度最高 (415.18°C),与粒径 ≤ 40 目 (411.40°C) 和 ≤ 80 目 (385.52°C) 之间无差异;粒径 ≤ 60 目燃烧温度较低 (345.47°C)。水湿地腐殖质粒径 ≤ 80 目时燃烧温度最高 (524.25°C) 与粒径 ≤ 40 目 (475.07°C) 之间不存在差异;粒径 ≤ 20 目燃烧温度最低 (374.22°C),且与其它 3 种粒径之间都存在显著差异。

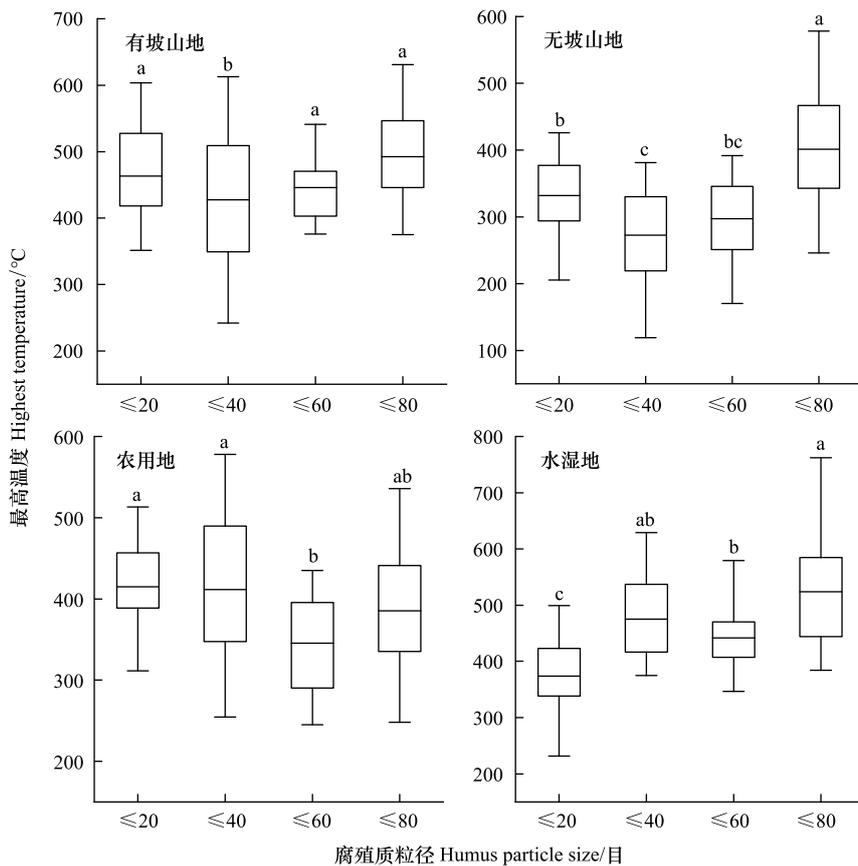


图 2 不同腐殖质粒径对地下火燃烧最高温度影响的多重比较

Fig.2 Multiple comparison of the effects of different humus particle sizes on the maximum combustion temperature of underground fire
a, b, c, d 不同字母间表示相关显著 ($P<0.05$)

由图 3 可知,4 种地类条件下均为深度 12cm 处的燃烧温度最高(有坡山地 544.28°C ;无坡山地 403.50°C ;农用地 462.27°C ;水湿地 548.84°C),与其他 3 个深度之间存在显著差异,其次深度 9cm 时的燃烧温度与 3cm 和 6cm 时的燃烧温度之间存在显著差异;深度 6cm 和 3cm 时燃烧温度较低,且二者之间不存在显著差异。

由图 4 可知,塔头甸子的所有粒径腐殖质都是在深度 12cm 时燃烧温度最高,其中当粒径 ≤ 80 目时温度最高,均值为 745.63°C ,并且与其它 3 个深度之间都存在显著差异;其次深度 9cm 时的燃烧温度与 3cm 和 6cm 时的燃烧温度之间存在显著差异;深度 3cm 和 6cm 时的燃烧温度较低,而且二者之间不存在差异。

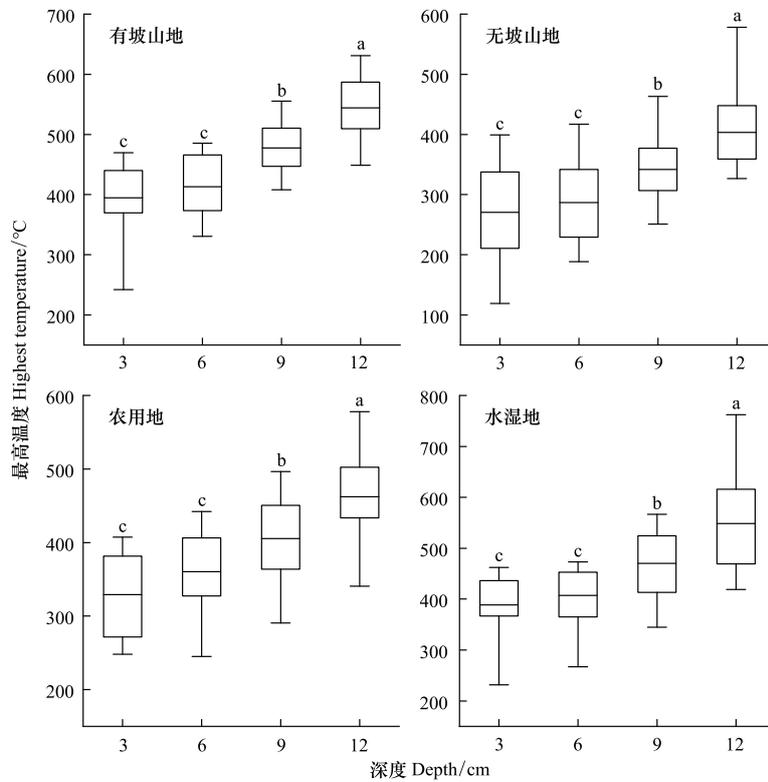


图3 不同深度对地下火燃烧最高温度影响的多重比较

Fig.3 Multiple comparison of the effects of different depths on the maximum combustion temperature of underground fire

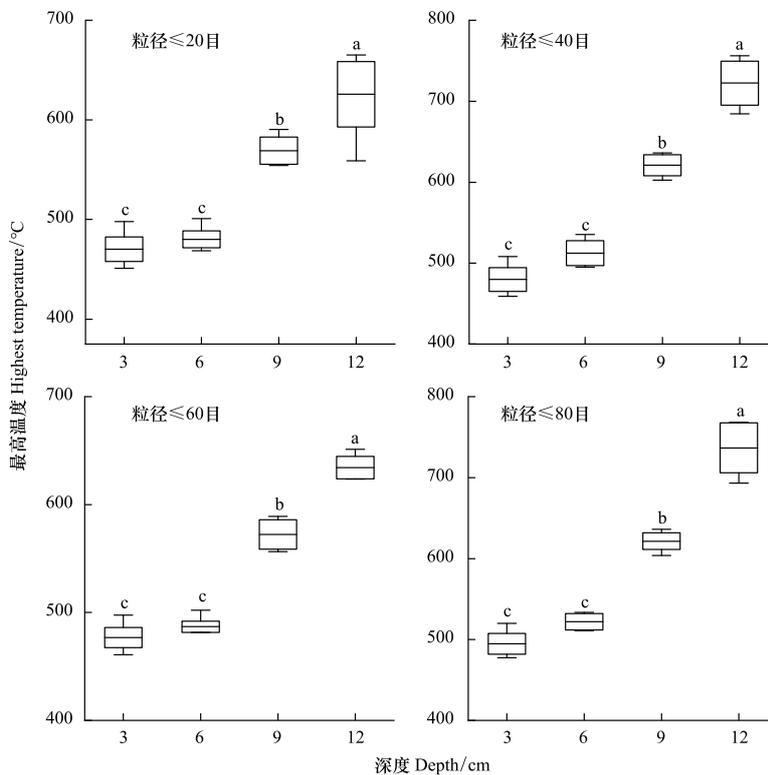


图4 不同深度对塔头甸子不同腐殖质粒径地下火燃烧最高温度影响的多重比较

Fig.4 Multiple comparison of the effects of different depths on the maximum combustion temperature of underground fire of different humus particle sizes in Tatuodianzi

3.2 不同燃烧深度的不同粒径腐殖质和地类对地下火燃烧最高温度的影响

根据方差分析可知,不同深度下不同粒径腐殖质、地类以及二者的交互作用对地下火燃烧最高温度的影响都存在显著差异($P<0.05$)。根据简单效应分析可知,在不同粒径腐殖质条件下,不同地类对地下火燃烧温度的影响均存在极显著差异($P<0.01$);而在不同地类条件下,不同腐殖质粒径之间未见差异($P>0.05$)。

由图 5 可知,当燃烧深度 3cm 腐殖质粒径 ≤ 20 目时,塔头甸子的燃烧温度最高(470.24 $^{\circ}\text{C}$),与水湿地、农用地、无坡山地之间存在显著差异;其次是有坡山地(406.13 $^{\circ}\text{C}$),无坡山地最低(287.90 $^{\circ}\text{C}$)。粒径 ≤ 40 目时,塔头甸子(479.81 $^{\circ}\text{C}$)与其它 3 种地类之间存在显著差异,其次是水湿地(399.14 $^{\circ}\text{C}$);无坡山地的燃烧温度最低(208.18 $^{\circ}\text{C}$)。粒径 ≤ 60 目和 ≤ 80 目都是塔头甸子、有坡山地、水湿地的燃烧温度较高并且之间不存在显著差异;农用地和无坡山地的燃烧温度较低。

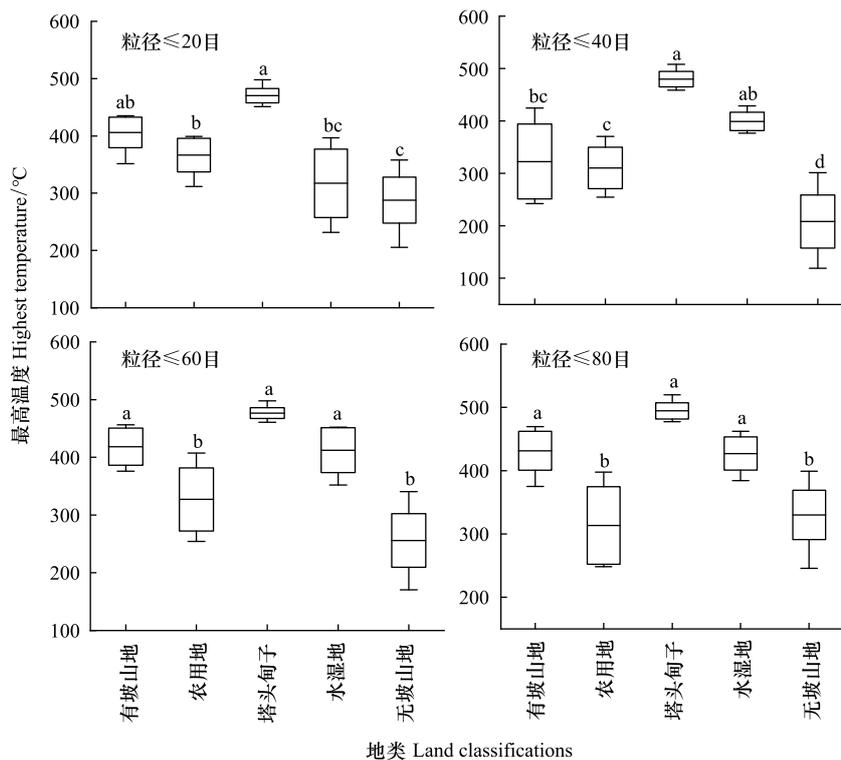


图 5 不同腐殖质粒径下不同地类对地下火燃烧最高温度影响的多重比较(3cm)

Fig.5 Multiple comparison of the effects of different land classifications on the maximum combustion temperature of underground fire under different humus particle sizes(3cm)

由图 6 可知,深度 6cm 腐殖质粒径 ≤ 20 目时,塔头甸子的腐殖质燃烧温度最高(480.14 $^{\circ}\text{C}$),与其它 4 种地类之间均存在显著差异;其次是有坡山地(397.72 $^{\circ}\text{C}$)和农用地(388.09 $^{\circ}\text{C}$);无坡山地的燃烧温度较低(301.11 $^{\circ}\text{C}$)。粒径 ≤ 40 目时,塔头甸子的腐殖质燃烧温度最高(512.34 $^{\circ}\text{C}$),与其它 4 种地类之间存在显著差异;其次是水湿地(434.03 $^{\circ}\text{C}$)、有坡山地(377.46 $^{\circ}\text{C}$)、农用地(377.03 $^{\circ}\text{C}$);无坡山地燃烧温度较低(230.79 $^{\circ}\text{C}$)。粒径 ≤ 60 目时,塔头甸子(486.88 $^{\circ}\text{C}$)、有坡山地(430.15 $^{\circ}\text{C}$)、水湿地(410.77 $^{\circ}\text{C}$)的燃烧温度较高;农用地(318.87 $^{\circ}\text{C}$)和无坡山地(256.19 $^{\circ}\text{C}$)的燃烧温度较低。粒径 ≤ 80 目时,塔头甸子的燃烧温度最高(521.83 $^{\circ}\text{C}$),与其它 4 种地类之间存在显著差异;其次是有坡山地(452.20 $^{\circ}\text{C}$)和水湿地(448.21 $^{\circ}\text{C}$);无坡山地(358.76 $^{\circ}\text{C}$)和农用地(357.32 $^{\circ}\text{C}$)的温度较低。

由图 7 可知,深度 9cm 时,无论哪种粒径下塔头甸子燃烧温度都是最高的,并且与其它 4 种地类之间都存在显著差异。粒径 ≤ 20 目时,有坡山地的燃烧温度(491.62 $^{\circ}\text{C}$)仅次于塔头甸子,与其他 3 种地类存在显著差

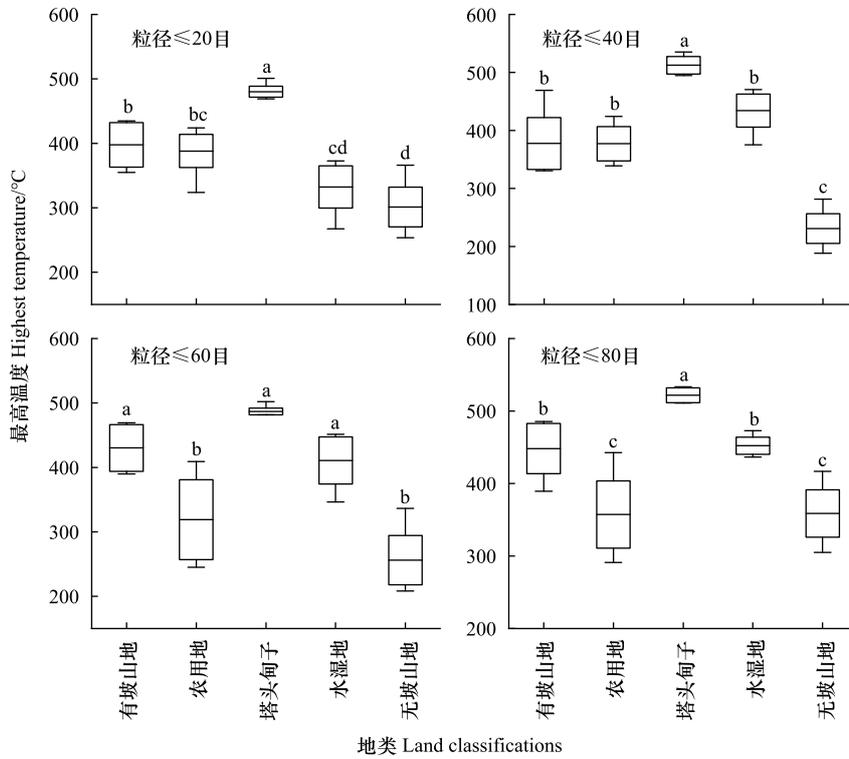


图 6 不同腐殖质粒径下不同地类对地下火燃烧最高温度影响的多重比较(6cm)

Fig.6 Multiple comparison of the effects of different land classifications on the maximum combustion temperature of underground fire under different humus particle sizes(6cm)

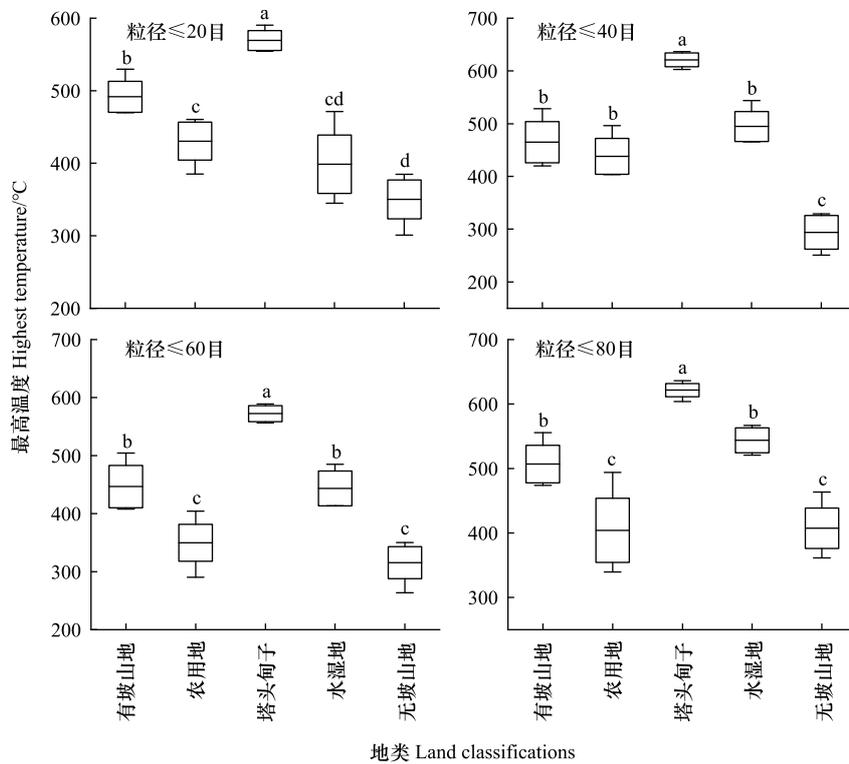


图 7 不同腐殖质粒径下不同地类对地下火燃烧最高温度影响的多重比较(9cm)

Fig.7 Multiple comparison of the effects of different land classifications on the maximum combustion temperature of underground fire under different humus particle sizes(9cm)

异;水湿地(398.58℃)和无坡山地(350.17℃)的燃烧温度较低。粒径 ≤ 40 目时,水湿地(494.67℃)、有坡山地(464.91℃)、农用地(438.35℃)的燃烧温度之间不存在显著。腐殖质粒径 ≤ 60 目和 ≤ 80 目时有坡山地和水湿地的腐殖质燃烧温度相近,并二者之间不存在显著差异,且都与农用地和无坡山地之间存在显著差异。

由图 8 可知,深度 12cm 腐殖质粒径 ≤ 20 目时,塔头甸子(625.75℃)的燃烧温度最高,并且与其它 4 种地类之间存在显著差异;其次是有坡山地(557.85℃),并且与农用地、水湿地和无坡山地之间存在显著差异;无坡山地的燃烧温度最低(388.87℃)。粒径 ≤ 40 目时,塔头甸子的燃烧温度最高(722.42℃),与其他 4 种地类之间存在显著差异;水湿地(572.43℃)、有坡山地(545.90℃)、农用地(519.67℃)的燃烧温度之间不存在显著差异。粒径 ≤ 60 目时,塔头甸子腐殖质燃烧的温度最高(634.27℃);水湿地(500.20℃)和有坡山地(489.92℃)的燃烧温度之间不存在显著差异。腐殖质粒径 ≤ 80 目时,塔头甸子(736.80℃)和水湿地(673.95℃)的燃烧温度之间不存在显著差异,但都与其它 3 种地类都存在显著差异,农用地的燃烧温度最低(467.39℃)。

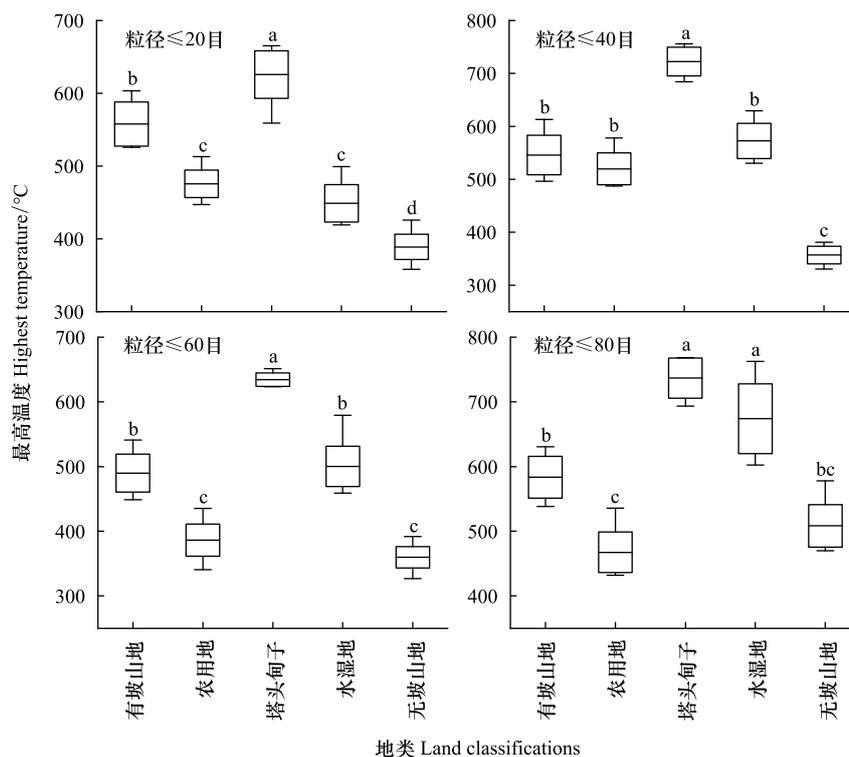


图 8 不同腐殖质粒径下不同地类对地下火燃烧最高温度影响的多重比较(12cm)

Fig.8 Multiple comparison of the effects of different land classifications on the maximum combustion temperature of underground fire under different humus particle sizes(12cm)

3.3 不同地类地下火燃烧温度与粒径、燃烧深度及距离的关系

由表 2 可知,有坡山地、水湿地、农用地三种地类下,深度、距离、腐殖质粒径 3 个自变量进入回归模型,可作为模型预测的自变量且均具有统计显著性($P < 0.05$)。塔头甸子和无坡山地地类下,经过逐步回归后,自变量距离被剔除,深度和腐殖质粒径 2 个自变量进入回归模型,可作为模型预测的自变量且均具有统计显著性($P < 0.01$)。得出不同地类地下火蔓延温度模型,其中, x_1 为深度、 x_2 为距离、 x_3 为腐殖质粒径; $R^2_{有坡山地} = 0.699$ 、 $R^2_{塔头甸子} = 0.811$ 、 $R^2_{水湿地} = 0.716$ 、 $R^2_{农用地} = 0.533$ 、 $R^2_{无坡山地} = 0.446$;5 个方程均通过了显著性检验(表 2)。

表 2 不同地类地下火燃烧温度预测模型

Table 2 Prediction model of combustion temperature of underground fire spread under different land classification

地类 Land classification	引入变量 Entering variable	R^2	P	模型 Model
有坡山地 Slope mountains	深度、距离、腐殖质粒径	0.699	0.033	$y = 232.375 + 17.096x_1 + 9.383x_2 + 0.530x_3$
塔头甸子 Tatuodianzi	深度、腐殖质粒径	0.811	0.003	$y = 357.907 + 23.138x_1 + 0.654x_3$
水湿地 Meadow bog	深度、距离、腐殖质粒径	0.716	0.000	$y = 155.176 + 18.079x_1 + 7.847x_2 + 2.084x_3$
农用地 Agricultural land	深度、距离、腐殖质粒径	0.533	0.010	$y = 271.732 + 14.803x_1 + 6.048x_2 - 0.775x_3$
无坡山地 Flat mountains	深度、腐殖质粒径	0.446	0.002	$y = 154.214 + 15.127x_1 + 1.159x_3$

x_1 : 深度; x_2 : 距离; x_3 : 腐殖反粒径

4 结论与讨论

地下火燃烧过程极为复杂,具有隐蔽性强、燃烧不连续、方向易变等特点^[28],所以很难开展实地点烧实验进行研究,目前国内外对地下火的相关研究绝大多数都以室内模拟点烧实验为主^[13,29-30]。地下火是森林中一种低温、无焰的阴燃现象^[31-32],燃烧过程一般无明火,依靠自身释放的热量维持,所以燃烧温度是研究其火行为特征的重要参考和依据^[22-23]。大兴安岭地区岭南的人工林生长量和蓄积要高于岭北地区^[33],而且位于岭南的加格达奇地区还分布着大面积在湿地种植的人工兴安落叶松林^[34],湿地土壤是地下火的易发生地区^[6],所以本文通过室内控制模拟点烧实验的方法对加格达奇地区 5 种地类条件下兴安落叶松人工林腐殖质阴燃温度变化的影响因素和预测进行了研究,结果表明不同地类、腐殖质粒径以及深度都影响地下火燃烧所释放的温度,者香^[19],尹赛男等^[20],Huang 等^[35]也曾指出地下火燃烧的最高温度受可燃物粒径和燃烧深度的影响,这与本研究的结论相符。森林可燃物是林火发生和燃烧的物质基础,可燃物的形状、密度、大小等特征都对火行为产生影响^[36]。本研究选择的不同地类条件下兴安落叶松林腐殖质在组成和结构等方面都不同,所以阴燃所产生的温度也有着明显的差异;腐殖质粒径直接影响可燃物中的氧气含量,而且氧气含量是影响阴燃的主要因素之一^[35],不同粒径可燃物的燃烧特征也是阴燃的重要研究方向之一^[37-38];地下火的燃烧除了水平蔓延还会向地下蔓延^[39],而不同深度地下火燃烧的氧气含量和热量损失不同,燃烧所释放的温度自然就存在差异。

通过研究发现不同地类条件下地下火燃烧过程中都是以腐殖质粒径 ≤ 80 时温度最高,辛颖等^[38]在相关研究中也指出粒径小的可燃物阴燃温度较高。这是由于小粒径的腐殖质燃烧释放的热量散失慢,同时随着粒径的减小增加了燃烧表面积,使燃烧过程更为剧烈,所以导致燃烧温度高^[38]。不同深度的腐殖质燃烧过程中,近表层的燃烧温度较低,深层的燃烧温度较高,者香等^[40]和尹赛男等^[20]的研究也表明阴燃温度随着深度的增加而升高。本次实验所使用的阴燃炉上层不密封,所以近表层的腐殖质燃烧热量散失快,而深度的腐殖质由于上层可燃物覆盖热量散失慢所以燃烧温度高。5 种地类中塔头甸子和水湿地的腐殖质燃烧温度要高于其他地类,尤其是塔头甸子。这两种地类属于湿地的一种,在同样气候类型下,地表有积水时微生物活性因氧气匮乏处于较低水平,有机残体分解缓慢,时间越长越有利于有机碳的积累^[41],而且有机质富集的泥炭地或湿地土壤很容易发生地下火^[6],所以导致这两种地类的腐殖质有机质含量高,地下火燃烧所释放的温度也高。

通过逐步回归法对不同地类的不同粒径腐殖质在不同深度和距离处的最高温度进行了预测,建立预测模型。其中深度、距离和粒径可作为有坡山地、水湿地和农用地条件下模型自变量,深度和腐殖质粒径可作为塔头甸子和无坡山地条件下模型自变量,模型各变量均通过了显著性检验($P < 0.05$)。受实验条件的限制,本研究仅对垂直与水平蔓延 12cm 内地下火燃烧最高温度进行了预测,而深层地下火的燃烧深度可达 20—50cm^[2],所以对腐殖质燃烧温度的预测研究还有研究空间。此外,腐殖质层的含水率、灰分含量与结构等均可能影响地下可燃物的燃烧^[18,37],所以作者接下来还会结合其他因素对地下火燃烧温度预测进行进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 唐抒圆, 李华, 单延龙, 肖云, 尹赛男. 森林地下火特征及防控措施. 世界林业研究, 2019, 32(3): 42-48.
- [2] Usup A, Hashimoto Y, Takahashi H, Hayasaka H. Combustion and thermal characteristics of peat fire in tropical peatland in Central Kalimantan, Indonesia. *Tropics*, 2004, 14(1): 1-19.
- [3] Davies G M, Gray A, Rein G, Legg C J. Peat consumption and carbon loss due to smouldering wildfire in a temperate peatland. *Forest Ecology and Management*, 2013, 308: 169-177.
- [4] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 魏书精, 吴泽鹏, 王振师, 李小川, 周宇飞. 林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响研究进展. *生态学报*, 2020, 40(6): 1839-1850.
- [5] Smith S M, Newman S, Garrett P B, Leeds J A. Differential effects of surface and peat fire on soil constituents in a degraded wetland of the northern Florida Everglades. *Journal of Environmental Quality*, 2001, 30(6): 1998-2005.
- [6] Huang X Y, Restuccia F, Gramola M, Rein G. Experimental study of the formation and collapse of an overhang in the lateral spread of smouldering peat fires. *Combustion and Flame*, 2016, 168: 393-402.
- [7] Heil A, Langmann B, Aldrian E. Indonesian peat and vegetation fire emissions; study on factors influencing large-scale smoke haze pollution using a regional atmospheric chemistry model. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, 12(1): 113-133.
- [8] Hu Y Q, Fernandez-Anez N, Smith T E L, Rein G. Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to regional haze episodes. *International Journal of Wildland Fire*, 2018, 27(5): 293-312.
- [9] 何诚, 舒立福, 刘超, 王越, 张元昊, 张运生. 南方人工林地阴燃火温度变化特征研究. *林业工程学报*, 2020, 5(2): 151-157.
- [10] 李禹洁. 森林腐殖质由阴燃向明火转变的实验研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
- [11] 张珍明, 周运超, 田潇, 黄先飞. 喀斯特小流域土壤有机碳空间异质性及储量估算方法. *生态学报*, 2017, 37(22): 7647-7659.
- [12] Pastor E, Oliveras I, Urquiaga-Flores E, Quintano-Loayza J A, Manta M I, Planas E. A new method for performing smouldering combustion field experiments in peatlands and rich-organic soils. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, 26(12): 1040-1052.
- [13] 何诚, 舒立福, 张思玉, 王越, 王明玉. 大兴安岭森林草原地下火阴燃特征研究. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2020, 40(2): 103-110.
- [14] 辛颖, 历美岑. 含水率对森林腐殖质阴燃传播的影响. *消防科学与技术*, 2017, 36(4): 448-450.
- [15] Grishin A M, Yakimov A S. Mathematical modelling of thermophysical processes at peat firing and smouldering. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2010, 17(1): 137-153.
- [16] Huang X Y, Rein G. Downward spread of smouldering peat fire; the role of moisture, density and oxygen supply. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, 26(11): 907-918.
- [17] Palamba P, Ramadhan M L, Imran F A, Kosasih E A, Nugroho Y S. Investigation of smoldering combustion propagation of dried peat. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1826(1): 020017.
- [18] Reardon J, Hungerford R, Ryan K. Factors affecting sustained smouldering in organic soils from pocosin and pond pine woodland wetlands. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, 16(1): 107-118.
- [19] 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.
- [20] 尹赛男, 单延龙, 宋光辉, 韩喜越, 高博. 不同粒径腐殖质火垂直燃烧特征研究. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(10): 95-101.
- [21] Watts A C, Kobziar L N. Smouldering combustion and ground fires: ecological effects and multi-scale significance. *Fire Ecology*, 2013, 9(1): 124-132.
- [22] Ohlemiller T J. Modeling of smoldering combustion propagation. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1985, 11(4): 277-310.
- [23] 尹赛男, 杜帅, 单延龙, 高博, 王明霞, 韩喜越, 张昊. 兴安落叶松人工林腐殖质阴燃燃烧温度变化特征. *生态学报*, 2021, 41(8): 3123-3130.
- [24] 戚玉娇, 李凤日. 基于KNN方法的大兴安岭地区森林地上碳储量遥感估算. *林业科学*, 2015, 51(5): 46-55.
- [25] 李明泽, 郭鸿郡, 范文义, 甄贞. 基于GWR的大兴安岭森林立地质量遥感分析. *林业科学*, 2017, 53(6): 56-66.
- [26] 胡海清, 罗碧珍, 魏书精, 魏书威, 文正敏, 孙龙, 罗斯生, 王立明, 马洪斌. 大兴安岭5种典型林型森林生物碳储量. *生态学报*, 2015, 35(17): 5745-5760.
- [27] 尹赛男. 大兴安岭兴安落叶松人工林地下火燃烧特征研究[D]. 吉林: 北华大学, 2020.
- [28] 舒立福, 王明玉, 田晓瑞, 李忠琦, 肖永军. 大兴安岭林区地下火形成火环境研究. *自然灾害学报*, 2003, 12(4): 62-67.
- [29] 王明霞, 王雅钧, 汪凤琴, 高博, 单延龙, 尹赛男, 季鑫, 舒立福. 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. *北京林业大学学报*, 2021, 43(3): 66-72.
- [30] Huang X Y, Rein G. Computational study of critical moisture and depth of burn in peat fires. *International Journal of Wildland Fire*, 2015, 24(6): 798-808.
- [31] 李忠琦, 张淑云, 李华, 王明玉. 黑龙江省呼中林区地下火发生的气象条件分析. *森林防火*, 2004, (1): 25-26.
- [32] 王文达, 尤飞, 胡世强. 不同密度FPUF阴燃特性及热解动力学分析. *消防科学与技术*, 2017, 36(2): 145-148.
- [33] 于忠成. 大兴安岭人工林生长调查分析. *内蒙古林业调查设计*, 2004, 27(2): 18-19.
- [34] 庄凯勋, 侯武才. 大兴安岭东部国有林区的湿地资源现状及保护对策. *东北林业大学学报*, 2006, 34(1): 83-86.
- [35] Huang X Y, Rein G. Upward-and-downward spread of smoldering peat fire. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 4025-4033.
- [36] 贺红土, 常禹, 胡远满, 刘志华. 森林可燃物及其管理的研究进展与展望. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 741-752.
- [37] 唐秋霞. 含水率和颗粒直径对生物质粉阴燃过程影响的实验研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2012.
- [38] 辛颖, 历美岑. 粒径对森林腐殖质阴燃传播的影响. *消防科学与技术*, 2017, 36(8): 1037-1040.
- [39] 张吉利, 邸雪颖. 地下火及阴燃研究进展. *温带林业研究*, 2018, 1(3): 19-22, 62-62.
- [40] 者香, 赵伟涛, 陈海翔, 周建军. 泥炭粒径对阴燃蔓延速率影响的实验研究. *火灾科学*, 2014, 23(3): 129-135.
- [41] 江长胜, 王跃思, 郝庆菊, 王定勇. 土地利用对沼泽湿地土壤碳影响的研究. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 248-252.