

DOI: 10.5846/stxb202009202446

李兆国, 瓮岳太, 徐建楠, 耿道通, 宁吉彬, 于宏洲, 邸雪颖, 杨光. 模拟地表火行为对燃烧剩余物水溶性碳氮的影响. 生态学报, 2022, 42(4): 1500-1511.

Li Z G, Weng Y T, Xu J N, Geng D T, Ning J B, Yu H Z, Di X Y, Yang G. Effect of the simulated surface fire behavior on water-soluble carbon and nitrogen in ash. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1500-1511.

## 模拟地表火行为对燃烧剩余物水溶性碳氮的影响

李兆国<sup>1</sup>, 瓮岳太<sup>1</sup>, 徐建楠<sup>2</sup>, 耿道通<sup>1</sup>, 宁吉彬<sup>1</sup>, 于宏洲<sup>1</sup>, 邸雪颖<sup>1</sup>, 杨光<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 东北林业大学林学院, 森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

<sup>2</sup> 国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714

**摘要:** 燃烧剩余物是火烧迹地土壤表面必然存在的残留物, 可以通过降水过程以及地表径流释放其所含有的矿物质和有机质至土壤生态系统, 从而在一定时间内持续地对火后生态系统恢复过程造成影响。但不同火行为下, 相同的可燃物所产生的燃烧剩余物可能具有不同的生态学功能, 为了认知火行为对燃烧剩余物的影响, 进一步了解二者对火烧迹地生态恢复过程中养分循环和能量流动的潜在影响, 探究了火行为对燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征的影响。以红松人工林地表可燃物为实验材料, 通过设置不同坡度和含水率为火行为的驱动因子, 进行了森林可燃物床层地表上坡火和下坡火的室内模拟燃烧实验。用独立样本 *T* 检验、单因素方差分析、多因素方差分析探究了火环境对燃烧剩余物水溶性碳氮和火行为的影响, 用基于距离的冗余分析 (db-RDA) 探究了火行为对燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征的影响。上坡火实验组的燃烧剩余物水溶性碳氮含量明显高于下坡火实验组 ( $P < 0.01$ ); 5° 实验组中, 燃烧剩余物的水溶性碳含量随着可燃物预设含水率的升高而升高 ( $P < 0.05$ )。进一步的数据分析发现火行为与燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征关系密切, 火焰宽度是影响燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征最显著的火行为因素, 与水溶性碳氮及水溶性碳氮比的相关系数分别为  $-0.515$ ,  $-0.317$ ,  $-0.550$  ( $P < 0.01$ )。火焰高度、燃烧效率与燃烧剩余物水溶性碳氮含量呈负相关, 火线强度与燃烧剩余物水溶性碳氮比呈负相关, 持续燃烧时间与燃烧剩余物水溶性碳氮含量呈正相关 ( $P < 0.05$ )。红松人工林地表可燃物燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征显著的受到火行为的直接影响和火环境的间接影响。火干扰可以通过影响燃烧剩余物特性对火烧迹地生态恢复过程造成持续性的潜在影响。

**关键词:** 模拟燃烧实验; 火行为; 燃烧剩余物; 水溶性碳氮; 化学计量特征

## Effect of the simulated surface fire behavior on water-soluble carbon and nitrogen in ash

LI Zhaoguo<sup>1</sup>, WENG Yuetai<sup>1</sup>, XU Jiannan<sup>2</sup>, GENG Daotong<sup>1</sup>, NING Jibin<sup>1</sup>, YU Hongzhou<sup>1</sup>, DI Xueying<sup>1</sup>, YANG Guang<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> School of Forestry, Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management-Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

<sup>2</sup> Academy of Forestry Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China

**Abstract:** Ash is the inevitable residues on the soil surface in burned area. Mineral and organic matter of ash can be released into the soil ecosystem through precipitation and surface runoff, which is an important way for fire to indirectly affect the restoration process of the post-fire ecosystem during a certain period of time. However, the ash from the same fuels but produced by different fire behaviors may have different ecological functions. In order to understand the influence of fire behavior on ash and their potential effects on the nutrient cycle and energy flow in the process of ecological restoration of the burned areas, the influence of fire behavior on the ash stoichiometric characteristics of water-soluble carbon and nitrogen

**基金项目:** 国家自然科学基金 (31870644); 黑龙江省自然科学基金 (LH2021C011)

**收稿日期:** 2020-09-20; **网络出版日期:** 2021-11-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lx\_yg@163.com

was explored. In this study, the surface fuel of *Pinus koraiensis* plantation was used as experimental materials, different slopes and fuel moisture content were set as the driving factors of fire behavior, and the indoor simulation combustion experiments of the upslope and downslope forest surface fire were performed on the combustion bed. The influence of fire environment on the stoichiometric characteristics of ash water-soluble carbon and nitrogen and fire behavior indicators was explored by the independent-samples *t*-test, One-way ANOVA, Multivariate ANOVA, while the distance-based Redundancy analysis was used to explore the relationship of fire behavior and the stoichiometric characteristics of ash water-soluble carbon and nitrogen. The water-soluble carbon and nitrogen content of ash in the upslope fire experiment group was significantly higher than that in the downslope fire experiment group ( $P < 0.01$ ); In the 5° experiment group, the water-soluble carbon and nitrogen content of the ash was increase with fuel moisture content ( $P < 0.05$ ). Further data analysis found that the fire behavior was closely related to the stoichiometric characteristics of the ash water-soluble carbon and nitrogen. The flame width was the most significant factor affecting the stoichiometric characteristics of ash water-soluble carbon and nitrogen, and the correlation coefficients with water-soluble carbon, nitrogen and the water-soluble carbon-nitrogen ratio of ash were: -0.515, -0.317, and -0.550 ( $P < 0.05$ ). The flame height and combustion efficiency were negatively correlated with the water-soluble carbon and nitrogen content of ash, the fire intensity was negatively correlated with the water-soluble carbon-nitrogen ratio of ash, and the duration was positively correlated with the ash water-soluble carbon and nitrogen content ( $P < 0.01$ ). The stoichiometric characteristics of ash water-soluble carbon and nitrogen from the *Pinus koraiensis* plantation were directly affected by fire behavior and indirectly affected by fire environment. Fire disturbance can have a continuously potential impact on the ecological restoration process of burned areas by affecting the characteristics of ash.

**Key Words:** simulated combustion experiment; fire behavior; ash; water-soluble carbon and nitrogen; stoichiometric characteristics

燃烧剩余物是火烧迹地土壤表面必然存在的生物体残留物,主要由矿质成分和碳化的有机质组成,具体包括生物炭、芳香烃类化合物、碳酸盐、磷酸盐等<sup>[1]</sup>,在生态系统响应火干扰的生态过程中扮演着重要角色,是野火间接影响陆地生态系统的桥梁<sup>[2]</sup>。

林火作为重要的生态因子,能够对森林生态系统的土壤理化性质<sup>[3-4]</sup>、生物群落<sup>[5-7]</sup>和林地小气候<sup>[8]</sup>等生态因子造成显著影响,从而影响整个森林生态系统的物质循环和能量流动过程。火行为和燃烧剩余物共同对火后物质循环<sup>[9]</sup>、微生物活动<sup>[10]</sup>、森林集水区水质<sup>[11-12]</sup>造成了巨大影响,火行为在短期内直接对生态系统的物质基础、生物活动造成多方面的影响,而火烧迹地残留的燃烧剩余物可以通过降水过程以及地表径流释放其所含有的矿物质和有机质,从而在一定时间内持续地对火后生态系统恢复过程造成影响。水溶性成分是生态系统中最为活跃的一部分营养物质,因其溶于水的特性,更易被微生物利用,从而参与到生态系统的物质循环、能量流动过程中<sup>[13-14]</sup>。因此,探究燃烧剩余物水溶性成分在火烧迹地生态恢复过程中的作用对研究火烧迹地恢复机制具有重要意义。近年来,国内林火生态领域的学者通常将火烧迹地土壤理化性质、火后微生物活动、火后植被恢复等课题作为研究重点<sup>[15-18]</sup>,对燃烧剩余物的研究相对较少。前期对燃烧剩余物的研究表明燃烧剩余物对植物种子的萌发过程有显著的影响<sup>[19-20]</sup>,火后黑炭会对土壤理化性质产生显著影响<sup>[21-25]</sup>,但燃烧剩余物水溶性碳氮的生态作用还有待深入研究。

可燃物性质、地形等因素显著影响火行为<sup>[26-30]</sup>,但不同火环境下的火行为对燃烧剩余物性质的影响还未有深入研究。为明晰火环境和火行为对森林燃烧剩余物水溶性碳氮产生的具体影响,本文以红松人工林地表可燃物燃烧剩余物为研究对象,通过模拟燃烧实验,研究森林地表火蔓延方向、可燃物含水率、坡度等因素对燃烧剩余物水溶性碳氮及火行为的影响,并在此基础上研究火行为对燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征的影响。以期为深入认识火干扰背景下森林生态恢复过程中的物质循环与能量流动机制提供一定的基础数据

和新的思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

东北林业大学帽儿山实验林场(45°15′—45°29′N、127°23′—127°43′E)位于黑龙江省尚志市,总面积为26496hm<sup>2</sup>。该区域位于长白山支脉张广才岭西北部的余脉,属于大陆性季风气候,年平均降水770mm,年平均气温3.1℃。该地区处于温带针阔叶混交林区,主要植被是阔叶红松林经过不同程度的干扰(采伐、经营、火烧和开垦等)后形成的东北东部山区典型天然次生林和人工林<sup>[31]</sup>。主要乔木树种包括红松(*Pinus koraiensis*)、白桦(*Betula phatyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、蒙古栎(*Querus mongolica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)等。红松是东北亚地区极具生态价值的主要的造林树种,也是我国东北地区珍贵树种之一。一方面,红松具有园林、食用、药用等方面的经济价值,另一方面,红松也在水土保持、水源涵养等方面发挥着巨大的生态作用。近年来红松人工林面积不断增加,这也增加了红松人工林潜在的林火风险,以红松人工林地表可燃物为研究对象,具有重大的实际意义。

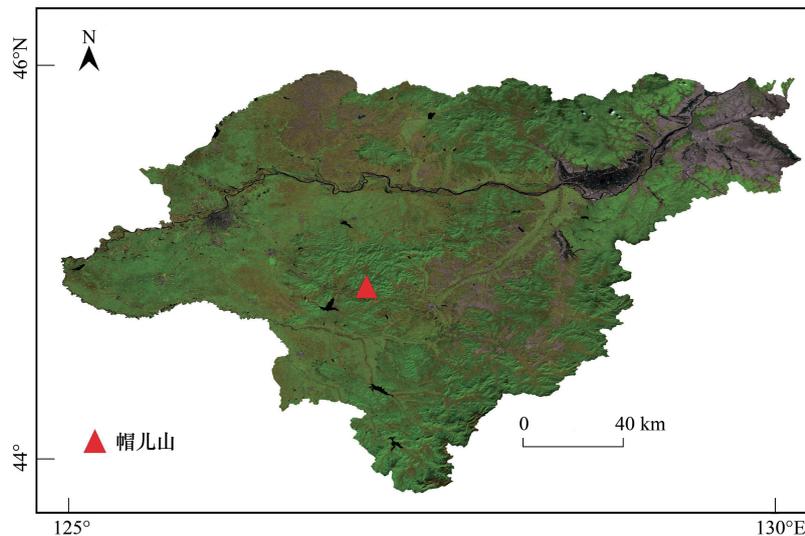


图1 帽儿山实验林场位置图

Fig.1 Location Map of Maershan Experimental Forest Farm

### 1.2 样地调查与样品采集

于2019年春季防火期在东北林业大学帽儿山实验林场建立了三块20m×20m的红松人工林标准样地,调查了林分基本信息(表1),并收集了地表可燃物。采用五点取样法设置调查样方(1m×1m)测定了可燃物载量。

表1 样地信息

Table 1 Plots information

样地编号 Plot number	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average height/m	郁闭度 Canopy density	可燃物载量 Fuel loading/(t/hm <sup>2</sup> )
1	22.7	13.7	0.6	7.85
2	26.9	20.3	0.7	8.25
3	18.2	24.3	0.8	7.93

DBH: 胸径 Diameter at breast height

### 1.3 模拟燃烧实验

燃烧实验在东北林业大学火行为实验室进行。燃烧实验预设 5%、15%、25% 3 个可燃物含水率 ( $FM$ ) 水平,  $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$  4 个坡度 ( $S$ ) 水平, 分别进行森林地表上坡火 (USF)、下坡火 (DSF) 两组不同森林地表火蔓延方向 ( $SD$ , Spread Direction) 的燃烧实验, 每种实验条件做 3 次重复实验共 54 组燃烧实验。燃烧实验在自制的变坡度燃烧床上进行, 其示意图如图 2 所示, 可通过该燃烧床实现对坡度, 森林地表上坡火、下坡火的模拟。

燃烧实验开始前应先做如下准备工作: 将红松人工林地地表可燃物含水率调节至约 5%、15%、25% 水平, 并将调节好含水率的红松人工林地地表可燃物置于密封箱内暂存, 进行燃烧实验时, 将红松人工林地地表可燃物均匀的撒落在  $1.3\text{m}\times 5\text{m}$  的燃烧床上。为在室内尽可能还原野外可燃物床层状态, 设置可燃物床层载量为  $8\text{t}/\text{hm}^2$ 。

燃烧实验: 通过预实验, 确定 1m 长的预燃区, 当火头通过预燃区, 即认为火蔓延至似稳态状态。在燃烧床引燃端有 5cm 宽的引燃带, 实验开始时倒入 50mL 酒精并点燃, 在燃烧床迅速形成一条火线, 并沿可燃物向前蔓延。将引燃端设置在燃烧床坡顶位置, 在燃烧床形成一条从坡顶蔓延至坡底方向的火线, 以实现森林地表下坡火的模拟, 将引燃端设置在燃烧床坡底位置, 在燃烧床形成一条火线从坡底蔓延至坡顶方向的火线, 以实现森林地表上坡火的模拟。相同坡度、含水率组合的燃烧实验都在相同实验条件下完成。

在燃烧实验中记录持续燃烧时间 ( $T$ ), 并用标杆法测量火焰高度 ( $FH$ )、火焰长度 ( $FL$ )、火焰宽度 ( $FW$ ), 并推算火线强度 ( $I$ ) 和火线高度强度 ( $I_h$ ), 推算公式如下:  $I = m \times c \times v$ , 式中  $I$ : 火线强度,  $\text{kJ m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ;  $m$ : 单位面积内的可燃物重量 ( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $c$ : 可燃物的平均发热量,  $\text{kJ}/\text{kg}$ ;  $v$ : 火线前进速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。  $I_h = 2.58h^{2.17}$ , 式中  $I_h$ : 火线高度强度,  $\text{kW}/\text{m}$ ;  $h$ : 火焰高度 ( $\text{m}$ )。燃烧实验结束后, 等待余烬完全熄灭后, 收集该场点烧实验的可燃物燃烧剩余物样品, 同时测定燃烧剩余物质量, 并计算可燃物燃烧效率 ( $E$ , combustion efficiency), 推算过程如下:  $E = \text{燃烧剩余物重量}/\text{可燃物重量}$ 。将燃烧剩余物粉碎后过 40 目筛, 放进封口袋中常温保存, 留待实验室分析。

### 1.4 样品分析

测定燃烧剩余物含水率: 称取约 10g 燃烧剩余物样品至干净的铝盒中, 置于烘箱  $105^\circ\text{C}$  烘干至恒重, 测定燃烧剩余物含水率。

测定燃烧剩余物水溶性碳 (WSC)、水溶性氮 (WSN): 精确称取 1.0000g (精确至 0.0001g) 燃烧剩余物样品, 加入 50mL 离心管中, 加入 20mL 去离子水, 在常温下振荡 1h, 10000g 离心 10min, 经  $0.45\mu\text{m}$  水系 MCE 滤膜抽滤为待测液<sup>[32]</sup>。水溶性碳氮含量使用德国耶拿 Multi N/C 2100S 分析仪测得。

### 1.5 统计分析

用 SPSS 25.0、R 3.5.3 软件对数据进行统计分析, 用 OriginPro 2018b、Graphpad Prism 8.0 软件进行数据可视化工作。用方差膨胀检验方法 (通过 car 包 vif 函数实现) 对 7 个火行为变量进行多重共线性检验, 筛选出  $E$ 、 $FW$ 、 $FH$ 、 $T$ 、 $I$  5 个非共线性火行为变量, 用独立样本  $T$  检验比较森林地表上坡火 (USF)、下坡火 (DSF) 两组不同森林地表火蔓延方向 ( $SD$ ) 的燃烧实验的差异; 用单因素方差分析比较燃烧剩余物 WSC、WSN 含量及 WSC/WSN 和火行为在不同可燃物含水率、不同坡度的差异; 用多因素方差分析法分析可燃物含水率、坡度、地表火蔓延方向及其交互作用对燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征以及火行为的影响, 用 Spearman 相关

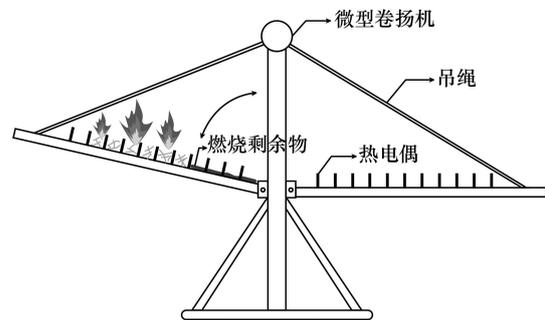


图 2 变坡度燃烧床示意图

Fig.2 Schematic diagram of variable slope combustion bed

系数评价火行为与燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特性间的相关关系,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ ;使用 R 语言 vegan 包,通过 db-RDA 分析 (Bray-Curtis 距离) 探究火行为对燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征的影响。

## 2 结果与分析

### 2.1 火环境对燃烧剩余物水溶性碳氮的影响

通过模拟燃烧实验,收集到 54 份燃烧剩余物样品,样品分析结果表明燃烧剩余物的 WSC 含量在 2.52mg/g 到 19.23mg/g 范围内,WSC 含量均值为  $(8.34 \pm 3.33)$  mg/g; WSN 含量在 0.06mg/g 到 0.44mg/g 范围内,WSN 含量均值为  $0.18 \text{mg/g} \pm 0.08 \text{mg/g}$ 。

用独立样本  $T$  检验比较森林地表上坡火、下坡火两组燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征的差异。如图 3 所示,上坡火实验组的燃烧剩余物 WSC、WSN 含量明显高于下坡火实验组 ( $P < 0.01$ ),两实验组燃烧剩余物 WSC/WSN 的差异并无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。总体而言,地表上坡火组的燃烧剩余物水溶性碳氮含量显著差别于地表下坡火组。

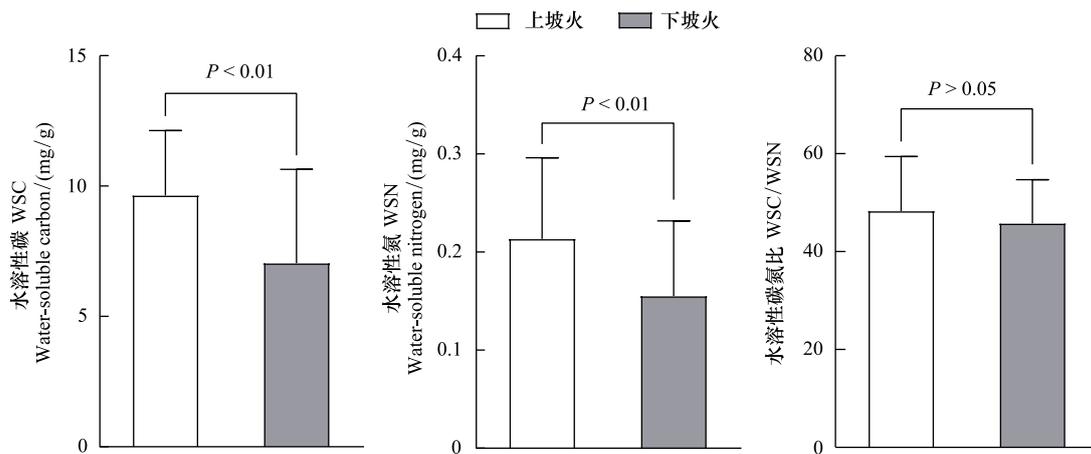


图 3 不同地表火蔓延方向下燃烧剩余物水溶性碳氮的生态化学计量特征

Fig.3 The stoichiometric characteristics of ash WSC and WSN in the different spread directions of surface fire

误差线为标准差

用单因素方差分析比较不同可燃物含水率、不同坡度实验组燃烧剩余物 WSC、WSN 含量及 WSC/WSN 之间的差异。如图 4 所示,5°实验组中,森林地表上坡火、下坡火两组燃烧剩余物的 WSC 含量均表现为:25% FM 实验组 > 15% FM 实验组 > 5% FM 实验组 ( $P < 0.05$ )。在相同含水率,下坡火实验组,5°实验组燃烧剩余物的 WSC 含量明显高于 10°、15°实验组 ( $P < 0.05$ )。如图 4 所示,各实验组的燃烧剩余物 WSN 含量和 WSC/WSN 并未表现出明显规律。综上所述,不同可燃物含水率、不同坡度条件下,燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征存在显著差异,火环境条件显著影响燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征。

### 2.2 模拟火环境对火行为的影响

在燃烧实验中记录每场点烧实验的  $T$ ,并用标杆法测量  $FH$ 、 $FL$ 、 $FW$ ,并推算  $I$  和  $I_h$ ,在燃烧实验结束后收集该场燃烧实验的可燃物燃烧剩余物样品,测定可燃物燃烧剩余物质量,并计算  $E$ 。应用方差膨胀检验方法对 7 个火行为变量进行多重共线性检验,筛选出  $E$ 、 $FW$ 、 $FH$ 、 $T$ 、 $I$  5 个火行为变量。

用独立样本  $T$  检验比较森林地表上坡火、下坡火火行为的差异。如图 5 所示,上坡火实验组的  $T$ 、 $E$  明显低于下坡火实验组,上坡火实验组的  $I$  明显高于下坡火实验组 ( $P < 0.01$ ),上坡火实验组的  $FH$  明显高于下坡火实验组 ( $P < 0.05$ ),两实验组  $FW$  的差异并无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。总体而言,地表上坡火组的火行为显著差别于地表下坡火组的火行为。

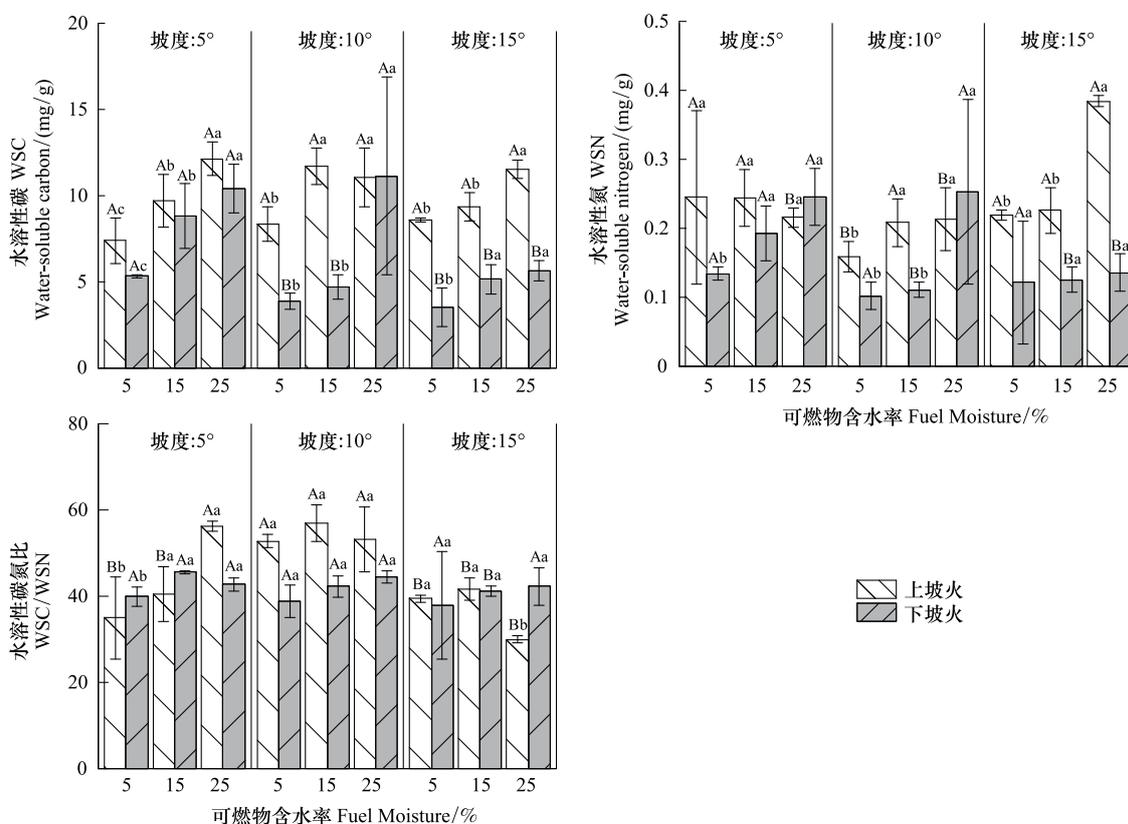


图 4 不同火环境条件下燃烧剩余物水溶性碳氮生态化学计量特征

Fig. 4 The stoichiometric characteristics of ash WSC and WSN under different combinatorial fire environments

误差线为标准差,柱状图上不同小写字母表示相同坡度不同可燃物含水率间差异具有统计学意义( $P < 0.05$ ),不同大写字母表示相同可燃物含水率不同坡度间差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )

用单因素方差分析比较不同可燃物含水率、不同坡度实验组火行为之间的差异。如图 6 所示,在相同坡度实验组中, $T$  均表现为:25%  $FM$  实验组 > 15%  $FM$  实验组 > 5%  $FM$  实验组 ( $P < 0.05$ )。在 25% 含水率,下坡火实验组, $T$  表现为:5° 实验组 > 10° 实验组 > 15° 实验组 ( $P < 0.05$ )。如图 6 所示,在不同可燃物含水率、坡度实验组之间, $E$  并未表现出显著规律;在相同坡度实验组中, $FH$  均表现为:5%  $FM$  实验组 > 15%  $FM$  实验组 > 25%  $FM$  实验组 ( $P < 0.05$ )。在相同可燃物含水率不同坡度实验组间, $E$  并未表现出显著规律。如图 6 所示,在 5°、10° 实验组中,5% 含水率实验组的  $FW$  明显高于 10%、15% 实验组 ( $P < 0.05$ )。在 15°、上坡火实验组中, $FW$  表现为:5%  $FM$  实验组 > 15%  $FM$  实验组 > 25%  $FM$  实验组 ( $P < 0.05$ )。在相同可燃物含水率不同坡度实验组之间, $FW$  并未表现出显著规律。如图 6 所示,在 5°、10° 实验组中, $I$  均表现为:5%  $FM$  实验组 > 15%  $FM$  实验组 > 25%  $FM$  实验组 ( $P < 0.05$ )。在 15° 实验组中,5% 含水率实验组的  $I$  明显高于 10%、15% 含水率实验组 ( $P < 0.05$ )。综上所述,不同可燃物含水率、不同坡度条件下,火行为存在显著差异,火环境条件显著影响火行为。

### 2.3 火环境和火行为对燃烧剩余物水溶性碳氮的影响

以燃烧剩余物样品 WSC、WSN 含量、WSC/WSN 为因变量,地表火蔓延方向、可燃物含水率、坡度为自变量进行多因素方差分析,结果如表 2 所示,地表火蔓延方向、可燃物含水率极显著影响燃烧剩余物的 WSC、WSN 含量 ( $P < 0.01$ ),坡度对燃烧剩余物 WSN 含量、WSC/WSN 造成显著影响 ( $P < 0.05$ )。此外,地表火蔓延方向和坡度的交互作用对燃烧剩余物的 WSC、WSN 含量、WSC/WSN 产生了显著影响 ( $P < 0.05$ ),地表火蔓延方向与可燃物含水率的交互作用、坡度与可燃物含水率的交互作用以及地表火蔓延方向、可燃物含水率、坡度三者的交互作用对燃烧剩余物的 WSC、WSN 含量均未产生显著影响 ( $P > 0.05$ ),而坡度与可燃物含水率的交互作用以

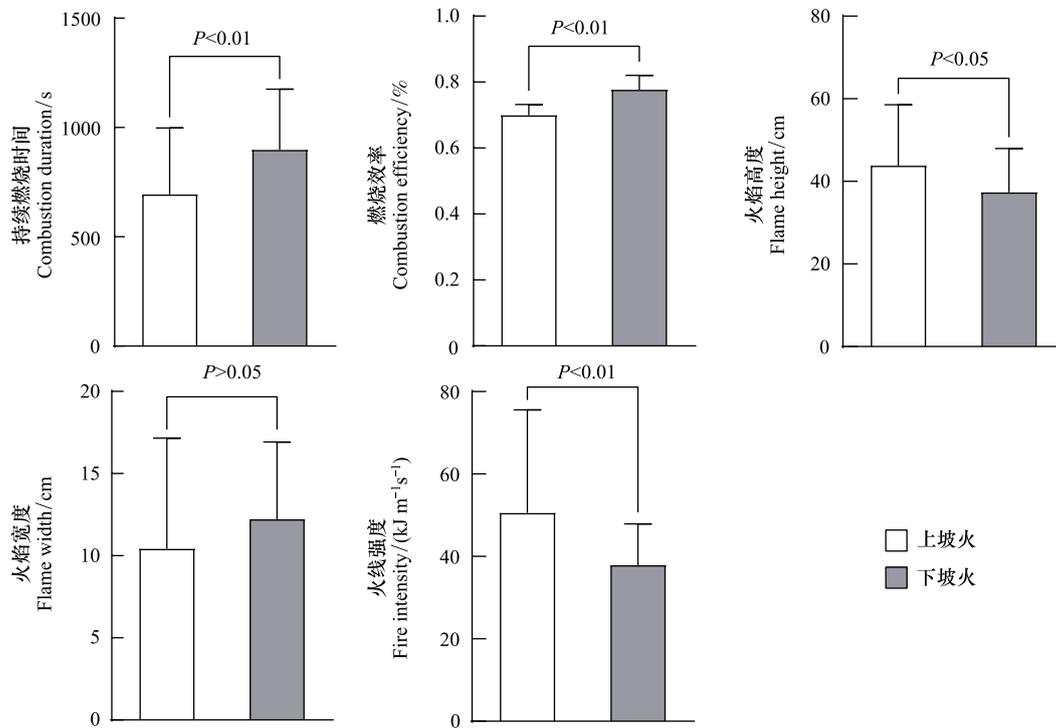


图5 不同地表火蔓延方向上火行为的差异

Fig.5 The Differences of Fire Behavior in the different spread directions of surface fire  
误差线为标准差

及地表火蔓延方向、可燃物含水率、坡度三者的交互作用对燃烧剩余物 WSC/WSN 产生显著影响 ( $P < 0.05$ )。

以  $E$ 、 $FW$ 、 $FH$ 、 $T$ 、 $I$  为因变量,地表火蔓延方向、可燃物含水率、坡度为自变量分别进行多因素方差分析,结果如表 3 所示,地表火蔓延方向、可燃物含水率、坡度以及地表火蔓延方向和坡度的交互作用对  $E$ 、 $FW$ 、 $FH$ 、 $T$ 、 $I$  产生了极显著影响 ( $P < 0.01$ ),而地表火蔓延方向与可燃物含水率的交互作用对  $FH$ 、 $I$  造成显著影响,而对  $E$ 、 $FW$ 、 $T$  的影响并不显著 ( $P > 0.05$ ),坡度与可燃物含水率的交互作用对  $FW$ 、 $T$ 、 $I$  造成显著影响 ( $P < 0.05$ ),却并未对  $E$ 、 $FH$  造成显著影响 ( $P > 0.05$ ),地表火蔓延方向、可燃物含水率、坡度三者的交互作用对  $FW$ 、 $FH$ 、 $I$  造成显著影响 ( $P < 0.01$ ),对  $E$ 、 $T$  均未产生显著影响 ( $P > 0.05$ )。

表 2 火环境条件及其交互作用对水溶性碳氮含量及水溶性碳氮比的影响

Table 2 Effects of fire environment conditions and their interaction on WSC, WSN and WSC/WSN

影响因素 Factors	F(WSC)	F(WSN)	F(WSC/WSN)
地表火蔓延方向 Spread direction of surface fire	20.35 **	14.032 **	3.874
坡度 Slope	1.678	3.448 *	40.207 **
可燃物含水率 Fuel moisture	19.353 **	8.463 **	3.73 *
地表火蔓延方向×坡度 Spread direction of surface fire × Slope	3.821 *	4.216 *	6.949 **
地表火蔓延方向×可燃物含水率 Spread direction of surface fire × Fuel moisture	0.441	0.224	0.002
坡度×可燃物含水率 Slope × Fuel moisture	0.497	0.66	2.986 *
地表火蔓延方向×坡度×可燃物含水率 Spread direction of surface fire × Slope × Fuel moisture	1.027	1.926	3.018 *

\* 表示  $P < 0.05$ , \*\* 表示  $P < 0.01$ , WSC: 水溶性碳 Water-Soluble Carbon; WSN: 水溶性氮 Water-Soluble Nitrogen; WSC/WSN: 水溶性碳氮比 Water-soluble carbon-water-soluble nitrogen ratio

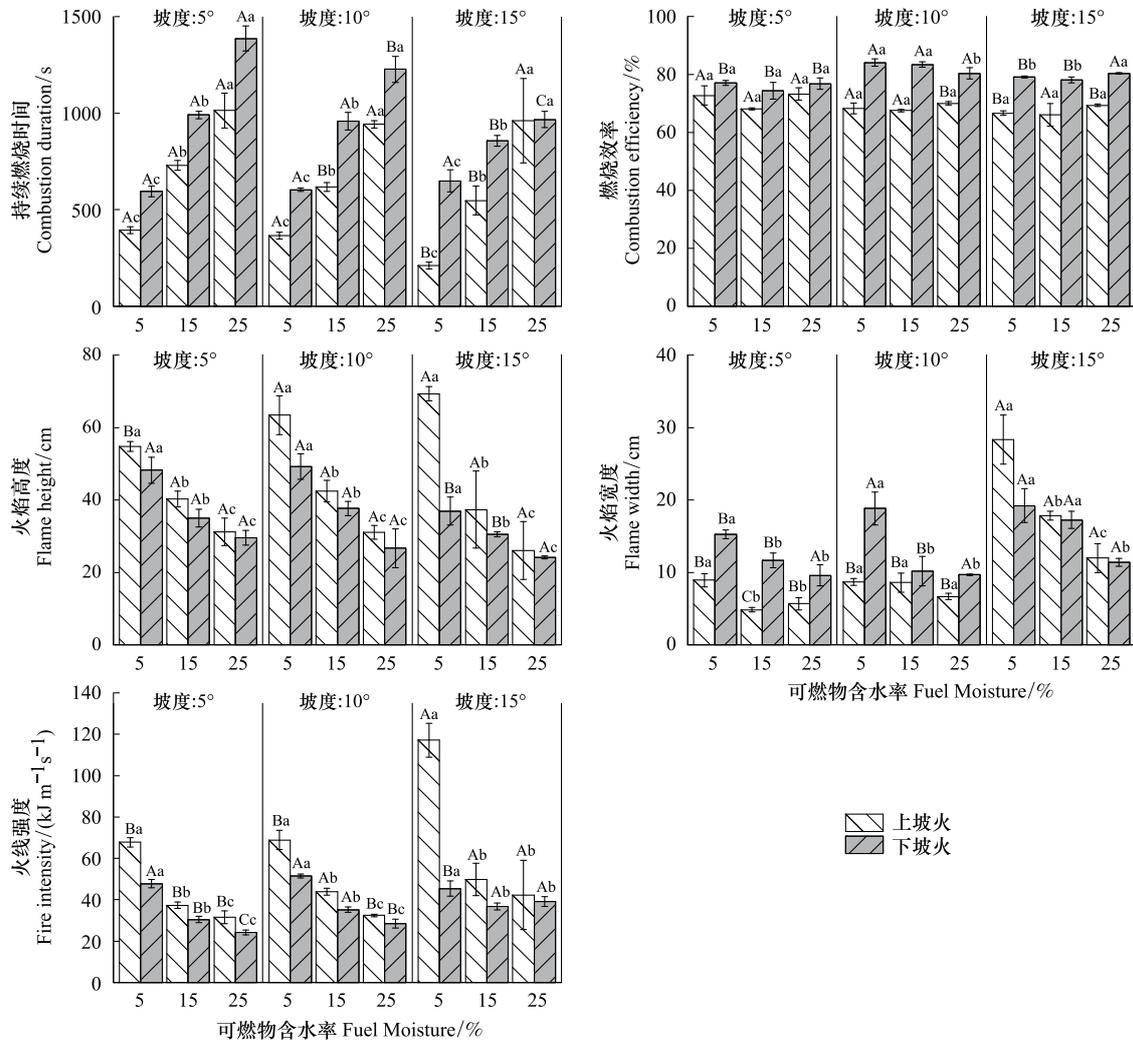


图 6 不同火环境的下火行为

Fig.6 The Differences of Fire Behavior under different fire environment

表 3 火环境条件及其交互作用对火行为的影响

Table 3 Effects of fire environment conditions and their interaction on Fire Behavior

影响因素 Factors	<i>F</i> ( <i>E</i> )	<i>F</i> ( <i>FW</i> )	<i>F</i> ( <i>FH</i> )	<i>F</i> ( <i>T</i> )	<i>F</i> ( <i>I</i> )
地表火蔓延方向 Spread direction of surface fire	238.554 **	19.708 **	27.685 **	53.562 **	104.867 **
坡度 Slpoe	6.273 **	121.52 **	4.293 **	9.31 **	35.575 **
可燃物含水率 Fuel moisture	6.194 **	121.505 **	154.199 **	120.651 **	253.805 **
地表火蔓延方向×坡度 Spread direction of surface fire×Slpoe	42.6 **	29.981 **	5.36 **	6.269 **	23.565 **
地表火蔓延方向×可燃物含水率 Spread direction of surface fire×Fuel moisture	2.511	0.124	7.895 **	0.064	35.71 **
坡度×可燃物含水率 Slpoe×Fuel moisture	2.108	5.989 **	0.832	2.344 *	3.971 **
地表火蔓延方向×坡度×可燃物含水率 Spread direction of surface fire×Slpoe×Fuel moisture	0.723	8.232 **	2.906 *	0.402	14.658 **

*E*:燃烧效率 Combustion efficiency;*FW*:火焰宽度 Flame width;*FH*:火焰高度 Flame height;*T*:持续燃烧时间 Combustion duration; *I*:火线强度

Fire intensity

用方差膨胀检验方法对 7 个火行为变量进行多重共线性检验,筛选出  $E$ 、 $FW$ 、 $FH$ 、 $T$ 、 $I$  5 个非共线性火行为变量,用 Spearman 相关系数评价火行为与燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特性间的相关关系,显著性水平设定为  $\alpha=0.05$ ,评价结果如表 4 所示。通过 DCA 分析判别使用线性模型更为合适(DCA 前四轴最大值小于 3),用火行为指标和燃烧剩余物水溶性碳氮两个数据矩阵进行 db-RDA 分析,db-RDA 分析结果如图 7 所示。

表 4 火行为与燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征的相关分析

Table 4 Correlation analysis of fire behavior and stoichiometric characteristics of water-soluble carbon and nitrogen in ash

指标 Index	$E$	$T$	$FH$	$FW$	$I$
WSC	-0.480 **	0.321 **	-0.329 **	-0.515 **	-0.380 **
WSN	-0.116	0.212	-0.251 *	-0.317 **	-0.227
WSC/WSN	-0.184	0.173	0.035	-0.550 **	-0.279 *

$E$ 、 $FW$ 、 $FH$ 、 $T$ 、 $I$  5 个火行为变量中, $FW$ 、 $FH$ 、 $E$  与 WSC、WSN 含量呈负相关( $P<0.05$ ),5 个火行为变量中  $FW$  对 WSC、WSN 含量及 WSC/WSN 的影响最大,相关系数达到  $-0.515$ 、 $-0.317$ 、 $-0.550$  ( $P<0.01$ ), $I$  与 WSC/WSN 呈负相关。 $T$  与 WSC、WSN 含量且呈正相关且相关系数达到  $0.321$  ( $P<0.01$ )。

### 3 讨论

可燃物燃烧剩余物是林火的复杂产物,其水溶性碳氮化学计量特征显著的受到火行为的直接影响和火环境的间接影响,即燃烧剩余物属性取决于地形因素、可燃物类型、火灾温度、燃烧程度等复杂因素的综合影响<sup>[33-38]</sup>。

#### 3.1 火环境显著影响燃烧剩余物属性

火环境会对燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征造成显著影响,这可能有两方面的原因,其一,不同火环境下的地表可燃物存在显著差异。其二,火环境条件通过影响火行为间接对森林燃烧剩余物属性造成显著影响。

首先,不同火环境下不同植被类型可燃物燃烧产生的燃烧剩余物显著不同<sup>[39]</sup>,其次不同火环境下,由于光照条件、立地条件的差异,相同植被类型可燃物的分解程度不同,这也是不同火环境下燃烧剩余物属性存在显著差异的原因。Merino 等人的研究显示,不同生态系统的可燃物燃烧产生的燃烧剩余物的组成和数量存在显著差异<sup>[40]</sup>,Yusiharni 等人则发现不同植被类型的燃烧剩余物对土壤理化性质产生的影响也不相同<sup>[41]</sup>。

森林地表火蔓延方向、温湿度等火环境条件通过影响火行为间接对森林燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征造成显著影响。本文的实验结果表明,在其他实验条件相同的情况下,森林地表上坡火燃烧剩余物水溶性碳氮含量显著高于森林地表下坡火。这可能是因为森林地表下坡火的燃烧时间及燃烧效率均显高于森林地表上坡火,持续燃烧时间越长,燃烧效率越高,森林燃烧剩余物燃烧越充分,森林燃烧剩余物水溶性碳氮含量就越低。而在森林地表火蔓延方向相同的情况下,不同含水率水平燃烧剩余物的水溶性碳氮含量与燃烧时间呈显著正相关,而燃烧时间与可燃物含水率呈显著正相关<sup>[42]</sup>,即可燃物含水率越高,燃烧时间越长,燃烧剩余物中可溶性碳氮的含量越高。这可能是因为可燃物含水率更高时,可燃物燃烧性相对较差<sup>[43]</sup>,一方面会造成燃烧时间增加,另一方面会导致可燃物燃烧不充分,残留更多的水溶性碳氮。在不同坡度实验组,燃烧剩余

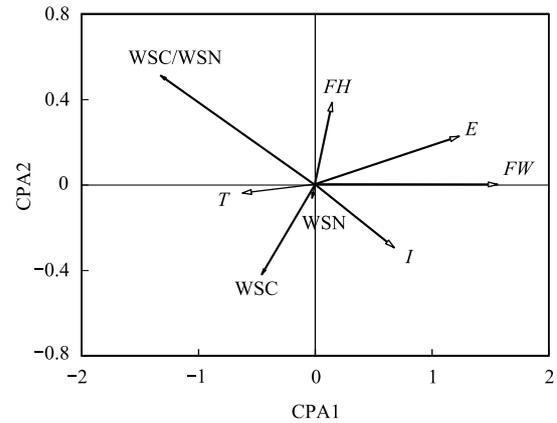


图 7 db-RDA 分析结果图

Fig.7 db-RDA analysis result graph

$E$ : 燃烧效率 Combustion efficiency;  $FW$ : 火焰宽度 Flame width;  $FH$ : 火焰高度 Flame height;  $T$ : 持续燃烧时间 Combustion duration;  $I$ : 火强度 Fire intensity; WSC: 水溶性碳 Water-Soluble Carbon; WSN: 水溶性氮 Water-Soluble Nitrogen; WSC/WSN: 水溶性碳氮比 Water-soluble carbon-water-soluble nitrogen ratio; db-RDA: 基于距离的冗余分析 distance-based redundancy analysis

物的水溶性碳氮含量的差异并未表现出明显规律,这可能是由于燃烧实验所设计的坡度梯度均属低坡度范围<sup>[44]</sup>,所以各坡度梯度实验组产生的森林燃烧剩余物水溶性碳氮含量差异不具有统计学意义。

### 3.2 火行为显著影响燃烧剩余物属性

火线强度、火焰宽度等火行为会对森林燃烧剩余物属性造成显著影响,这可能是由于不同火行为下,地表可燃物的燃烧程度、燃烧过程存在显著差异。

火强度会显著影响燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征。Balfour, Raison, Yusiharni 等人通过设定马弗炉温度梯度模拟火强度梯度,发现不同火强度下产生的燃烧剩余物属性及其颜色存在显著差异,较低火强度下产生的燃烧剩余物其有机质含量更高<sup>[40-41]</sup>,燃烧剩余物的酸碱度和电导率会随火强度的升高而升高<sup>[45]</sup>。而本研究中也发现类似的结果,db-RDA 分析结果表明,火线强度与水溶性碳氮比呈显著负相关,即火线强度越高,燃烧剩余物水溶性碳氮含量越低,碳酸盐、硅酸盐等矿质成分含量增加<sup>[46-48]</sup>。地表可燃物的燃烧程度和燃烧过程会显著影响燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征。本文发现,燃烧效率、火焰宽度会显著影响燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征,db-RDA 分析结果表明,燃烧效率、火焰宽度与燃烧剩余物水溶性碳氮含量呈显著负相关,即燃烧效率、火焰宽度越高,燃烧剩余物水溶性碳氮含量就越低。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

燃烧剩余物作为火烧迹地上必然存在的生物体残留物,是生态系统响应火干扰的生态过程中关键的一环,而火行为作为林火干扰生态系统的宏观表现形式,会对燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征造成显著影响,火环境则能通过影响火行为间接对燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征造成显著影响。火干扰可以通过影响燃烧剩余物特性对火烧迹地生态恢复过程造成持续性的潜在影响。

本研究有助于深入认识燃烧剩余物在生态系统响应火干扰的生态过程中所扮演的角色,可用于评估受火干扰红松人工林生态系统恢复所需营养素的类型和数量,有助于进一步认识计划烧除对红松人工林的影响,为科学实施计划烧除提供参考。

### 4.2 展望

在本研究中,通过预设地表火蔓延方向、可燃物含水率以及坡度条件作为林火驱动因子,展开了模拟燃烧实验,研究了火环境因素对燃烧剩余物及火行为的影响,并在此基础上研究了火行为对燃烧剩余物水溶性碳氮化学计量特征的影响。前人对燃烧剩余物的研究,大致分为两类,1)在实验室中通过马弗炉制备燃烧剩余物样品<sup>[39,41]</sup>,展开对燃烧剩余物特征的研究。但有研究表明通过马弗炉制备的燃烧剩余物样品与野火发生后留下来的燃烧剩余物存在显著差异,并不能很好的表征森林燃烧剩余物的特征<sup>[49]</sup>;2)在森林火灾发生后收集燃烧剩余物样品<sup>[40,50-51]</sup>,或通过进行计划烧除实验<sup>[46]</sup>来研究燃烧剩余物特征,但该类研究显然难以具体探究火行为、可燃物因素对燃烧剩余物的影响。在国内林火生态领域,本研究是首次对燃烧剩余物的水溶性碳氮化学计量特征展开研究,在一定程度上填补了国内林火生态领域对燃烧剩余物研究的空白。本研究也存在一定的局限性,在未来的研究中,应进一步引入风速、温度、湿度等林火驱动因子,在最大程度上模拟林火发生时的火环境及火行为,尽可能的增加实验方法的可靠性。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Bodí M B, Martín D A, Balfour V N, Santín C, Doerr S H, Pereira P, Cerdà A, Mataix-Solera J. Wildland fire ash: production, composition and eco-hydro-geomorphic effects. *Earth-Science Reviews*, 2014, 130: 103-127.
- [ 2 ] Pereira P, Jordán A, Cerdà A, Martín D. Editorial: the role of ash in fire-affected ecosystems. *CATENA*, 2015, 135: 337-339.
- [ 3 ] Caon L, Vallejo V R, Ritsema C J, Geissen V. Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. *Earth-Science Reviews*, 2014, 139: 47-58.
- [ 4 ] Mataix-Solera J, Cerdà A, Arcenegui V, Jordán A, Zavala L M. Fire effects on soil aggregation: a review. *Earth-Science Reviews*, 2011, 109(1/

- 2): 44-60.
- [ 5 ] Costa M R, Calvão A R, Aranha J. Linking wildfire effects on soil and water chemistry of the Marão River watershed, Portugal, and biomass changes detected from Landsat imagery. *Applied Geochemistry*, 2014, 44: 93-102.
- [ 6 ] Gonino G, Branco P, Benedetto E, Ferreira M T, Santos J M. Short-term effects of wildfire ash exposure on behaviour and hepatosomatic condition of a potamodromous cyprinid fish, the Iberian barbel *Luciobarbus bocagei* (Steindachner, 1864). *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 226-234.
- [ 7 ] Harper A R, Santin C, Doerr S H, Froyd C A, Albin D, Otero X L, Viñas L, Pérez-Fernández B. Chemical composition of wildfire ash produced in contrasting ecosystems and its toxicity to *Daphnia magna*. *International Journal of Wildland Fire*, 2019, 28(10): 726-737.
- [ 8 ] 赵晓霞, 张自学, 袁建新. 森林火灾对林地小气候的影响. *气象*, 1990, 16(1): 50-52, 56-56.
- [ 9 ] Ku P J, Tsui M T K, Nie X P, Chen H, Hoang T C, Blum J D, Dahlgren R A, Chow A T. Origin, reactivity, and bioavailability of mercury in wildfire ash. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(24): 14149-14157.
- [ 10 ] Zhang Y Y, Yan C C, Liu H J, Pu S Y, Chen H L, Zhou B H, Yuan R F, Wang F. Bacterial response to soil property changes caused by wood ash from wildfire in forest soils around mining areas: Relevance of bacterial community composition, carbon and nitrogen cycling. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 412: 125264.
- [ 11 ] Brito D Q, Santos L H G, Passos C J S, Oliveira-Filho E C. Short-term effects of wildfire ash on water quality parameters: a laboratory approach. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, doi: 10.1007/S00128-021-03220-9.
- [ 12 ] Emmerton C A, Cooke C A, Hustins S, Silins U, Emelko M B, Lewis T, Kruk M K, Taube N, Zhu D N, Jackson B, Stone M, Kerr J G, Orwin J F. Severe western Canadian wildfire affects water quality even at large basin scales. *Water Research*, 2020, 183: 116071.
- [ 13 ] Rueda-Delgado G, Wantzen K M, Tolosa M B. Leaf-litter decomposition in an Amazonian floodplain stream: effects of seasonal hydrological changes. *Journal of the North American Benthological Society*, 2006, 25(1): 233-249.
- [ 14 ] Martínez A, Larrañaga A, Pérez J, Descals E, Pozo J. Temperature affects leaf litter decomposition in low-order forest streams: field and microcosm approaches. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, 87(1): 257-267.
- [ 15 ] 刘发林, 陈小伟, 曾素平. 不同火干扰强度对枫香次生林土壤理化性质的影响. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 132-138.
- [ 16 ] 曾素平, 刘发林, 赵梅芳, 王光军, 陈小伟. 火干扰强度对亚热带四种森林类型土壤理化性质的影响. *生态学报*, 2020, 40(1): 233-246.
- [ 17 ] 刘冠宏, 李炳怡, 宫大鹏, 李伟克, 刘晓东. 林火对北京平谷区油松林土壤化学性质的影响. *北京林业大学学报*, 2019, 41(2): 29-40.
- [ 18 ] 刘乐中, 杨玉盛, 郭剑芬, 袁一丁. 杉木人工林皆伐火烧后土壤呼吸研究. *亚热带资源与环境学报*, 2008, 3(1): 8-14.
- [ 19 ] 李明月, 刘维东, 周旭昌, 刘强, 王顺忠, 谷会岩. 烟熏和火烧灰对 3 种草本植物种子萌发的影响. *东北林业大学学报*, 2019, 47(8): 14-21.
- [ 20 ] 巴丽娜, 刘强, 张芸慧, 王顺忠, 谷会岩. 烟熏、热激、火烧灰对大青杨种子萌发的影响. *东北林业大学学报*, 2018, 46(6): 27-32, 68-68.
- [ 21 ] 尹云锋, 杨玉盛, 高人, 陈光水, 谢锦升, 钱伟, 赵月彩. 皆伐火烧对杉木人工林土壤有机碳和黑碳的影响. *土壤学报*, 2009, 46(2): 352-355.
- [ 22 ] 王玉哲, 刘俊第, 严强, 方熊, 易志刚, 胡亚林, 刘先. 马尾松林采伐迹地火烧黑炭对土壤活性碳氮库的影响. *生态学报*, 2018, 38(20): 7198-7207.
- [ 23 ] 高德才, 张蕾, 刘强, 荣湘民, 张玉平, 田昌. 生物黑炭对旱地土壤 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O 排放及其环境效益的影响. *生态学报*, 2015, 35(11): 3615-3624.
- [ 24 ] 任清胜, 辛颖, 赵雨森. 重度火烧对大兴安岭落叶松天然林土壤团聚体有机碳和黑碳的影响. *北京林业大学学报*, 2016, 38(2): 29-36.
- [ 25 ] 王曦, 杨靖宇, 俞元春, 侯文军, 侯也, 余健, 王如海. 不同功能区城市林业土壤黑碳含量及来源——以南京市为例. *生态学报*, 2016, 36(3): 837-843.
- [ 26 ] 徐伟恒, 黄邵东, 杨磊, 徐盛基, 戴杨, 王秋华. 滇东北地区云南松地表可燃物载量及火强度研究. *西部林业科学*, 2019, 48(4): 19-26.
- [ 27 ] 陶奇, 谢小冬, 张林鹤, 李韩, 袁协尚, 华涵铨. 点火源引燃的上坡火蔓延实验研究. *火灾科学*, 2018, 27(2): 92-99.
- [ 28 ] 舒立福, 王玉玉, 田晓瑞, 张小罗, 戴兴安. 关于森林燃烧火行为特征参数的计算与表述. *林业科学*, 2004, 40(3): 179-183.
- [ 29 ] 李明泽, 康祥瑞, 范文义. 呼中林区火烧迹地遥感提取及林火烈度的空间分析. *林业科学*, 2017, 53(3): 163-174.
- [ 30 ] 韩树庭, 张景忠, 韩益斌, 周薇. 森林火行为指标计算方法. *林业科技*, 1996, 21(4): 28-31.
- [ 31 ] 刘帆, 王传宽, 王兴昌, 张建双, 张著, 王家骏. 帽儿山温带落叶阔叶林通量塔风浪区生物量空间格局. *生态学报*, 2016, 36(20): 6506-6519.
- [ 32 ] Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, Matzner E. Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 273-291.
- [ 33 ] Goforth B R, Graham R C, Hubbert K R, Zanner C W, Minnich R A. Spatial distribution and properties of ash and thermally altered soils after high-severity forest fire, southern California. *International Journal of Wildland Fire*, 2005, 14(4): 343-354.

- [34] Gray D M, Dighton J. Mineralization of forest litter nutrients by heat and combustion. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(6): 1469-1477.
- [35] Liodakis S, Katsigiannis G, Kakali G. Ash properties of some dominant Greek forest species. *Thermochimica Acta*, 2005, 437(1/2): 158-167.
- [36] Qian Y, Miao S L, Gu B, Li Y C. Effects of burn temperature on ash nutrient forms and availability from cattail (*Typha domingensis*) and sawgrass (*Cladium jamaicense*) in the Florida everglades. *Journal of Environmental Quality*, 2009, 38(2): 451-464.
- [37] Úbeda X, Pereira P, Outeiro L, Martin D A. Effects of fire temperature on the physical and chemical characteristics of the ash from two plots of cork oak (*Quercus suber*). *Land Degradation & Development*, 2009, 20(6): 589-608.
- [38] Gabet E J, Bookter A. Physical, chemical and hydrological properties of Ponderosa pine ash. *International Journal of Wildland Fire*, 2011, 20(3): 443-452.
- [39] Raison R J, McGarity J W. Some effects of plant ash on the chemical properties of soils and aqueous suspensions. *Plant and Soil*, 1980, 55(3): 339-352.
- [40] Merino A, Chávez-Vergara B, Salgado J, Fonturbel M T, García-Oliva F, Vega J A. Variability in the composition of charred litter generated by wildfire in different ecosystems. *CATENA*, 2015, 133: 52-63.
- [41] Yusiharni E, Gilkes R. Minerals in the ash of Australian native plants. *Geoderma*, 2012, 189-190: 369-380.
- [42] 金森, 刘磷霏, 邸雪颖, 褚腾飞, 张吉利. 平地无风条件下蒙古栎阔叶床层的火行为 I. 蔓延速率影响因子与预测模型. *应用生态学报*, 2012, 23(1): 51-59.
- [43] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 苏漳文, 魏书精, 孙龙. 森林可燃物含水率及其预测模型研究进展. *世界林业研究*, 2017, 30(3): 64-69.
- [44] 朱霁平, 刘小平, 林其钊, 王清安. 变坡度情况下森林地表上坡火行为若干特征的实验研究. *火灾科学*, 1999, 8(2): 63-71.
- [45] Balfour V N, Woods S W. The hydrological properties and the effects of hydration on vegetative ash from the Northern Rockies, USA. *CATENA*, 2013, 111: 9-24.
- [46] Pereira P, Úbeda X, Martin D, Mataix-Solera J, Guerrero C. Effects of a low severity prescribed fire on water-soluble elements in ash from a cork oak (*Quercus suber*) forest located in the northeast of the Iberian Peninsula. *Environmental Research*, 2011, 111(2): 237-247.
- [47] Pereira P, Úbeda X, Martin D A. Fire severity effects on ash chemical composition and water-extractable elements. *Geoderma*, 2012, 191: 105-114.
- [48] Santín C, Doerr S H, Otero X L, Chafer C J. Quantity, composition and water contamination potential of ash produced under different wildfire severities. *Environmental Research*, 2015, 142: 297-308.
- [49] Bodí M B, Mataix-Solera J, Doerr S H, Cerdà A. The wettability of ash from burned vegetation and its relationship to Mediterranean plant species type, burn severity and total organic carbon content. *Geoderma*, 2011, 160(3/4): 599-607.
- [50] Campos I, Abrantes N, Keizer J J, Vale C, Pereira P. Major and trace elements in soils and ashes of eucalypt and pine forest plantations in Portugal following a wildfire. *Science of the Total Environment*, 2016, 572: 1363-1376.
- [51] Pereira P, Úbeda X, Martin D, Mataix-Solera J, Cerdà A, Burguet M. Wildfire effects on extractable elements in ash from a *Pinus pinaster* forest in Portugal. *Hydrological Processes*, 2014, 28(11): 3681-3690.