

DOI:10.12171/j.1000-1522.20210118

## 黑龙江大兴安岭地区兴安落叶松人工林阴燃过程中的 温度变化及主要气体释放特征

唐抒圆<sup>1</sup> 高博<sup>1</sup> 于渤<sup>1</sup> 王晓迪<sup>2</sup> 尹赛男<sup>1</sup> 单延龙<sup>1</sup> 韩喜越<sup>1</sup> 曹丽丽<sup>1</sup>

(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. 吉林省森林防火预警监测指挥中心, 吉林 长春 130022)

**摘要:**【目的】模拟阴燃过程, 研究土壤表层温度变化规律和气体释放特征, 为阴燃燃烧动力学、阴燃蔓延机制和阴燃火灾监测等研究提供理论支持。【方法】以大兴安岭地区兴安落叶松人工林土壤为研究对象, 通过阴燃炉实验, 分析测定不同燃烧时间下的土壤温度和气体(CO<sub>2</sub>、CO)释放量, 及不同含水率(20%、30%、40%)对气体释放量的影响。【结果】阴燃过程中土壤表层温度呈现先快速增加, 然后保持平稳, 最后快速下降直至熄灭的变化趋势; 根据土壤表层温度变化特征, 将阴燃过程分为点燃期、上升期、稳定期和熄灭期4个阶段, 各阴燃阶段校正燃烧效率(MCE)均小于0.75; 阴燃过程中CO<sub>2</sub>平均释放量为316.23 mg/m<sup>3</sup>, CO平均释放量为101.25 mg/m<sup>3</sup>; 阴燃过程中CO呈现持续性释放状态, CO<sub>2</sub>呈现间歇性释放状态; 燃烧时间对CO<sub>2</sub>和CO释放量存在显著性影响, 但CO<sub>2</sub>和CO释放量不存在相关关系; 不同含水率下, CO<sub>2</sub>释放量呈现显著性差异( $P < 0.05$ ), 但CO释放量无显著性差异( $P > 0.05$ )。【结论】根据阴燃中的温度和气体变化, 阴燃在14 h后出现向明燃转化的趋势, 但由于土壤中可燃物含量下降, 最终未转化为明燃; 由于含水率升高导致土壤氧气含量下降和热量损失增加, 因此CO<sub>2</sub>释放量降低; 在含水率20%~40%的条件下, 阴燃均可以维持蔓延传播, 因此CO释放量无显著性差异。

**关键词:** 兴安落叶松人工林; 阴燃; 温度变化; 含水率; 气体释放

中图分类号: S762 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2022)07-0001-07

引文格式: 唐抒圆, 高博, 于渤, 等. 黑龙江大兴安岭地区兴安落叶松人工林阴燃过程中的温度变化及主要气体释放特征[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(7): 1-7. Tang Shuyuan, Gao Bo, Yu Bo, et al. Temperature changes and main gas release characteristics of *Larix gmelinii* plantations during smoldering in Daxing'anling Mountain region of Heilongjiang Province, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(7): 1-7.

### Temperature changes and main gas release characteristics of *Larix gmelinii* plantations during smoldering in Daxing'anling Mountain region of Heilongjiang Province, northeastern China

Tang Shuyuan<sup>1</sup> Gao Bo<sup>1</sup> Yu Bo<sup>1</sup> Wang Xiaodi<sup>2</sup> Yin Sainan<sup>1</sup>  
Shan Yanlong<sup>1</sup> Han Xiyue<sup>1</sup> Cao Lili<sup>1</sup>

(1. Beihua University Science and Technology Innovation Center of Wildland Fire Prevention and Control,

Forestry College of Beihua University, Jilin 132013, Jilin, China;

2. Forest Fire Prevention Early Warning Monitoring Command Center of Jilin Province, Changchun 130022, Jilin, China)

**Abstract:** [Objective] This paper simulates the smoldering combustion process, and discusses the characteristics of soil surface temperature and main emissions in order to provide scientific reference for smoldering combustion kinetics, spread mechanism and fire monitoring. [Method] Taking the forest soil in the *Larix gmelinii* plantations of the Daxing'an Mountains as the research object, the temperature

收稿日期: 2021-03-29 修回日期: 2021-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31971669)。

第一作者: 唐抒圆, 讲师。主要研究方向: 森林防火。Email: slslyess@163.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。

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。

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

variation, main emissions and the effect of moisture content (20%, 30%, 40%) on emissions were analyzed by the results of smouldering furnace experiment. [Result] The soil surface temperature firstly increased rapidly, then remained stable, and finally decreased rapidly until extinguished during the smouldering combustion process; according to the characteristics of soil surface temperature, the smouldering combustion was divided into four stages, i.e. ignition stage, rise stage, steady stage and extinguishing stage, and the modified combustion efficiency (MCE) of each smoldering stage was less than 0.75; the average concentration of  $\text{CO}_2$  was  $316.23 \text{ mg/m}^3$ , and the average concentration of CO was  $101.25 \text{ mg/m}^3$ ; in the smouldering combustion process,  $\text{CO}_2$  emission was intermittent, but CO emission was continuous; combustion time had a significant effect on  $\text{CO}_2$  and CO, but there was no correlation between  $\text{CO}_2$  and CO; there was significant difference between the concentration of  $\text{CO}_2$  under different moisture contents ( $P < 0.05$ ), but there was no significant difference between the concentrations of CO ( $P > 0.05$ ). [Conclusion] The smouldering combustion shows a trend of conversion to flaming combustion after 14 h, according to the temperature and emission variation during the smouldering furnace experiment, but the combustion burnt out in the end for the decrease of combustible content; the concentration of  $\text{CO}_2$  decreases with the increase of water content, resulting from the decrease of oxygen content and the increase of heat loss; smoldering combustion could maintain spread with moisture content of 20%–40%, so the concentration of CO has no significant difference.

**Key words:** *Larix gmelinii* plantation; smouldering combustion; temperature variation; moisture content; gas emission

根据燃烧过程中有无火焰, 可以将森林火灾划分为明燃火灾和阴燃火灾<sup>[1]</sup>, 明燃是指发光发热的有焰燃烧, 火焰温度可以高达  $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$ ; 阴燃是指缓慢传播的无焰燃烧, 阴燃峰值温度一般在  $500\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$  之间<sup>[2]</sup>。研究发现, 阴燃过程中会释放大量颗粒物和浓度高气体, 如  $\text{CO}_2$ 、CO、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{NH}_3$  和烷烃等<sup>[3]</sup>, 且 CO 释放量远高于普通森林火灾<sup>[4]</sup>。森林阴燃火灾主要发生在腐殖质层和泥炭层<sup>[5]</sup>, 相对于其他森林火灾, 虽然阴燃发生频率较低, 但会导致根系破坏、地面塌陷、气体污染等巨大危害<sup>[3,6]</sup>。研究人员发现, 随着近年来全球气温升高, 北方林区气候干旱, 森林阴燃火灾发生概率呈现上升趋势<sup>[7]</sup>。

一般认为, 阴燃过程分为点燃、自维持及熄灭 3 个阶段。点燃阶段指外界加热源以一定功率或温度向材料提供能量, 使热源附近的材料热解和氧化反应加快, 温升速率和质量损失速率迅速增加; 自维持阶段指材料依靠自身化学反应累计热量, 使阴燃不断传播直至材料耗尽; 熄灭阶段指自身化学反应热释放量无法弥补热损失量, 导致阴燃过程终止<sup>[8]</sup>。

目前, 对阴燃的研究一般分为微观尺度、小尺度和大尺度研究。微观尺度一般以毫克为研究级别, 用热重分析法探究阴燃反应机制、构建反应动力学模型等<sup>[9-10]</sup>; 小尺度一般为阴燃炉或燃烧箱实验, 用于分析含水率、氧气含量、有机质、无机物、温度等因素对阴燃发生、传播速率和传播方向的影响, 或阴燃过程中的气体及颗粒物释放<sup>[11-14]</sup>; 大尺度一般在

大范围火灾中进行监测, 实验范围接近于真实火场, 但受控于实验条件, 实验开展困难且取得的数据受不可控因素影响较大<sup>[15]</sup>。

森林地下火是一种缓慢、无焰且持久的阴燃燃烧, 可以靠自身所释放的热量维持蔓延<sup>[4]</sup>, 由于阴燃在地表下以无火焰形式缓慢进行, 隐蔽性极强, 所以普通林火监测技术难以及时发现火情<sup>[16]</sup>, 甚至会在一定条件下转化成明燃火灾<sup>[1]</sup>, 造成更大灾害。另外, 由于地下可燃物自身性质的影响, 导致地下火线呈现出间断不规则的燃烧路线, 扑火人员难以预判<sup>[17]</sup>, 易对扑火人员生命安全造成威胁。可见通过研究森林阴燃火灾特征规律, 提出有效的阴燃防控措施, 并及时阻断阴燃蔓延传播, 是降低森林阴燃火灾发生概率, 减少阴燃火灾破坏程度的重要途径。

目前, 关于森林阴燃火灾的研究主要集中在泥炭层阴燃, 且多采用实验室配比或商业泥炭为实验材料, 难以真实反应森林阴燃火灾蔓延特征, 关于中国北方森林阴燃火灾燃烧特征和蔓延机制的研究更是鲜有报道<sup>[18]</sup>。中国大兴安岭林区位于对全球气候变化最为敏感的地区之一, 受气候变化影响的持续时间长<sup>[19]</sup>, 随着全球气候变暖, 近年来该区域地下火发生频数和火灾强度均呈增加趋势<sup>[20]</sup>, 且易发生于凋落物丰富, 腐殖质含量高的区域<sup>[7]</sup>。因此, 本研究以大兴安岭地区兴安落叶松人工林为研究对象, 分析其温度变化和气体释放特征, 为阴燃燃烧动力学、阴燃蔓延机制和阴燃火灾监测等研究提供理论支持。

# 1 研究区概况与研究方法

## 1.1 研究区概况

本研究区域位于大兴安岭东坡, 加格达奇区以南 15 km 处, 大兴安岭地区加格达奇森林经营技术推广站(50°20' ~ 50°23' N, 123°57' ~ 124°00' E)。年平均气温-1~2 ℃, 年有效积温 1 800 ~ 2 000 ℃·d, 无霜期 90 ~ 120 d, 年降雨量 450 ~ 500 mm。主要树种为柞树(*Quercus mongolica*)、兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*)、黑桦(*Betula davurica*)等。该区域大面积在塔头湿地种植人工兴安落叶松, 林下环境复杂、地下可燃物丰富, 为森林地下火的发生提供了有利条件<sup>[10]</sup>。

## 1.2 实验方法

2018 年春季防火期前往大兴安岭地区加格达奇森林经营技术推广站进行野外调查, 选取研究区域内不同地类下兴安落叶松人工林为实验样地, 样地具体信息见表 1。在每个地类下随机选取 3 块 30 m × 20 m 的实验样地, 在每块样地内的对角线处挖掘 3 块 0.5 m × 0.5 m(边长)的样方, 挖掘样方内的所有腐殖质, 使用土壤盒带回实验室用于阴燃炉实验, 用土壤水分测定仪(HTY-720MS)测定土壤含水率。不同样方土壤实际含水率可以划分为 3 个梯度, 分别约为 20%、30% 和 40%(以下简称 20%、30%、40%)。

将采集的腐殖质样品置于 1.5 m × 0.5 m × 0.5 m(长 × 宽 × 高)的阴燃炉中, 阴燃炉内部为 5 cm 厚的防火岩棉, 具有保温隔热效果, 可用于模拟地下火的

点燃、维持和熄灭阶段。使用远红外加热板作为实验引燃装置, 根据预实验结果, 将加热温度设置为 700 ℃, 用控温表控制加热板温度稳定; 使用 K 型热电偶和数据采集模块采集并记录阴燃过程中腐殖质层温度变化, K 型热电偶通过预设孔洞插入腐殖质中间部位, 测定不同位置腐殖质阴燃温度; 使用多功能烟气分析仪(ecom-J2KN), 测定 CO<sub>2</sub> 和 CO 浓度, 测定时打开阴燃炉上方盖门, 插入多功能烟气分析仪, 待仪器读数稳定后记录气体浓度, 待气体排尽(仪器读数为 0)时, 关闭盖门, 由于地下火阴燃过程缓慢, 烟气的释放和积累也较慢, 同时为尽量避免频繁开关盖门造成的阴燃炉内空气流动, 影响烟气释放浓度, 所以每 2 h 测定一次阴燃过程中释放的气体浓度(图 1)。

## 1.3 数据分析

数据统计分析采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件, 运用 Pearson 相关性分析和单因素方差分析(one-way ANOVA test), 并选取 LSD(the least-significant differences)法研究阴燃过程中温度和气体变化特征。采用 Origin Pro 9.1 软件制图。

## 1.4 校正燃烧效率 (MCE)

校正燃烧效率(MCE)指燃烧过程中释放的 CO<sub>2</sub> 质量浓度与 CO<sub>2</sub> 和 CO 质量浓度之和的比值, 常用于分析生物质的燃烧状态。一般认为, 当 MCE 达到 0.99 时为明燃, MCE 为 0.75 ~ 0.84 之间为阴燃<sup>[21]</sup>。

$$MCE = \frac{C_{CO_2}}{C_{CO_2} + C_{CO}} \quad (1)$$

表 1 样地基本信息

Tab. 1 Basic information of sample plots

| 编号<br>No. | 树种组成<br>Tree species composition | 海拔<br>Altitude/m | 经纬度<br>Longitude and latitude | 胸径<br>DBH/cm | 林龄/a<br>Forest age/year | 郁闭度<br>Canopy density |
|-----------|----------------------------------|------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------|
| 1         | 8兴安落叶松                           | 566.0            | 124°02'24"E<br>50°20'24"N     | 22.4         | 22                      | 0.7                   |
|           | 8 <i>Larix gmelinii</i>          |                  |                               |              |                         |                       |
|           | 1白桦                              |                  |                               |              |                         |                       |
|           | 1 <i>Betula platyphylla</i>      |                  |                               |              |                         |                       |
|           | 1 蒙古栎                            |                  |                               |              |                         |                       |
| 2         | 1 <i>Quercus mongolica</i>       | 406.3            | 124°05'24"E<br>50°19'05"N     | 22.5         | 27                      | 0.5                   |
|           | 兴安落叶松                            |                  |                               |              |                         |                       |
|           | 8 <i>Larix gmelinii</i>          |                  |                               |              |                         |                       |
|           | 9兴安落叶松                           |                  |                               |              |                         |                       |
|           | 9 <i>Larix gmelinii</i>          |                  |                               |              |                         |                       |
| 3         | 1白桦                              | 379.7            | 124°06'36"E<br>50°18'00"N     | 21.2         | 26                      | 0.8                   |
|           | 1 <i>Betula platyphylla</i>      |                  |                               |              |                         |                       |
|           | 兴安落叶松                            |                  |                               |              |                         |                       |
|           | 8 <i>Larix gmelinii</i>          |                  |                               |              |                         |                       |
|           | 1白桦                              |                  |                               |              |                         |                       |
| 4         | 1 <i>Betula platyphylla</i>      | 407.2            | 124°04'48"E<br>50°18'00"N     | 20.6         | 28                      | 0.8                   |
|           | 兴安落叶松                            |                  |                               |              |                         |                       |
|           | 8 <i>Larix gmelinii</i>          |                  |                               |              |                         |                       |
|           | 8兴安落叶松                           |                  |                               |              |                         |                       |
|           | 8 <i>Larix gmelinii</i>          |                  |                               |              |                         |                       |
| 5         | 1白桦                              | 553.8            | 124°01'12"E<br>50°21'00"N     | 14.8         | 16                      | 0.7                   |
|           | 1 <i>Betula platyphylla</i>      |                  |                               |              |                         |                       |
|           | 1蒙古栎                             |                  |                               |              |                         |                       |
|           | 1 <i>Quercus mongolica</i>       |                  |                               |              |                         |                       |
|           |                                  |                  |                               |              |                         |                       |

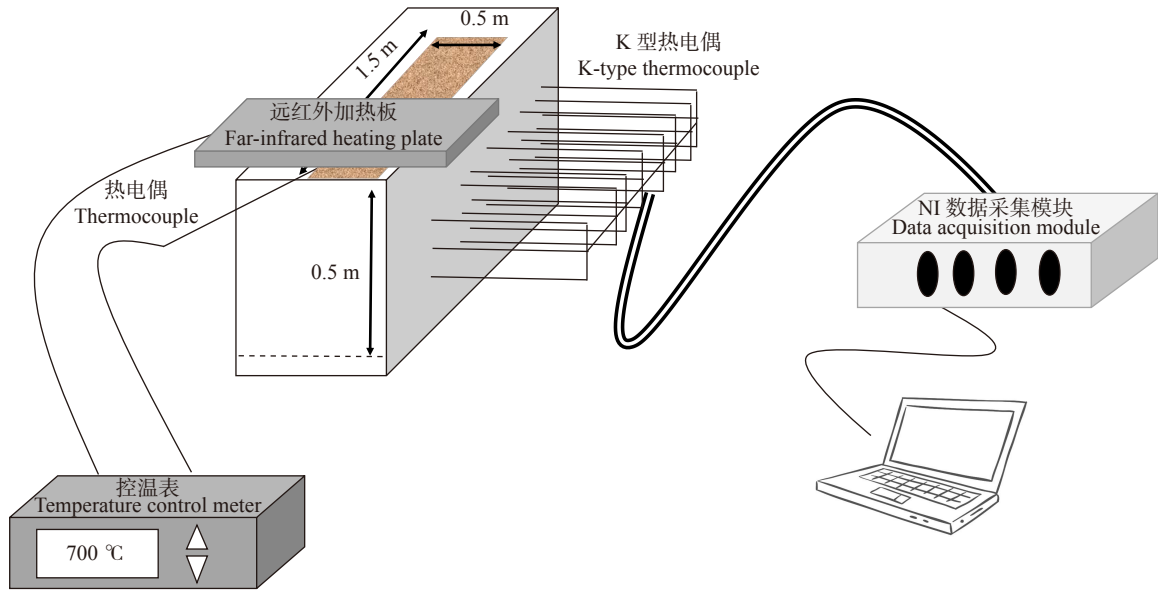


图 1 阴燃炉实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of smouldering combustion experiment

式中: MCE 为校正燃烧效率,  $C_{CO_2}$  为  $CO_2$  质量浓度 ( $mg/m^3$ ),  $C_{CO}$  为 CO 质量浓度 ( $mg/m^3$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 燃烧过程中 MCE 和温度变化趋势

根据阴燃过程中的温度变化和课题组前期的研究成果, 本研究将森林阴燃过程分为点燃期、上升期、稳定期和熄灭期 4 个阶段, 且通过实验发现, 各阴燃阶段的 MCE 均小于 0.75(表 2)。

各燃烧阶段的 MCE 无显著性差异 ( $P = 0.461$ ,  $P > 0.05$ ), 但各燃烧阶段的平均燃烧温度差异性显著 ( $P = 0.038$ ,  $P < 0.05$ ), 且呈现温度先快速上升, 之后温度基本稳定, 最后温度快速下降直至熄灭的阴燃过程(图 2)。通过 Pearson 相关性分析发现, 各燃烧阶段的 MCE 和平均燃烧温度无相关关系 ( $P = 0.794$ ,  $P > 0.05$ )。可见, MCE 无法有效解释和分析阴燃的蔓延过程, 这一结论与 Hu 等的研究结果一致<sup>[22]</sup>。

### 2.2 阴燃过程中的 $CO_2$ 和 CO 释放

实验结果显示(图 3), 阴燃过程中持续释放

CO, 平均 CO 质量浓度为  $101.25 mg/m^3$ , 第一个 CO 峰值  $166.75 mg/m^3$  出现在 2 h 左右, 之后 CO 释放量随燃烧时间增加而降低, 在 10 h 出现小幅度增加后又继续降低, 但在 14 h 时出现 CO 最高值, 高达  $247.75 mg/m^3$ , 之后继续降低并趋近于 0。  $CO_2$  在阴燃过程中的平均释放质量浓度为  $316.23 mg/m^3$ , 但不同于 CO, 在 8 h 和 12 h 时未检测到  $CO_2$  释放且阴燃过程中  $CO_2$  的变化幅度较小, 2 h 之后的  $CO_2$  释放量均在阴燃过程的  $CO_2$  平均释放量以下, 直至 16 h 时出现  $CO_2$  最大值  $2258.75 mg/m^3$ , 之后  $CO_2$  质量浓度迅速下降, 到 18 h 时已经检测不到  $CO_2$  释放。另外, 在阴燃熄灭期, CO 和  $CO_2$  释放量变化趋势一致, 均出现在 12 h 处达到阴燃过程的最低值, 然后释放量迅速上升至阴燃过程的最高值现象。

分析发现, 燃烧时间对  $CO_2$  和 CO 释放量存在显著性影响(表 3); Pearson 相关性分析发现,  $CO_2$  和 CO 释放量不存在相关关系 ( $P = 0.156$ ,  $P > 0.05$ )。

### 2.3 不同含水率下的 $CO_2$ 和 CO 释放

根据样品检测结果, 本实验样地土壤含水率均

表 2 阴燃过程及基本情况

Tab. 2 Process of the smouldering combustion and basic information

| 阴燃阶段<br>Smouldering stage       | 燃烧时间<br>Combustion time/h | 燃烧过程<br>Combustion process                                                        | 平均校正燃烧效率<br>Average modified combustion efficiency (MCE) | 平均温度<br>Average temperature/°C |
|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------|
| 点燃期<br>Ignition stage (I)       | 0 ~ 2                     | 地表温度快速上升至 100 °C 以上<br>Soil surface temperature rises rapidly to more than 100 °C | $0.34 \pm 0.47$                                          | $100.71 \pm 114.14$            |
| 上升期<br>Rise stage (II)          | 2 ~ 6                     | 地表温度逐渐上升至 400 °C 左右<br>Soil surface temperature rises gradually to about 400 °C   | $0.58 \pm 0.13$                                          | $281.25 \pm 94.03$             |
| 稳定期<br>Steady stage (III)       | 6 ~ 12                    | 地表温度稳定在 400 ~ 500 °C<br>Soil surface temperature stays around 400–500 °C          | $0.31 \pm 0.36$                                          | $425.81 \pm 41.99$             |
| 熄灭期<br>Extinguishing stage (IV) | > 12                      | 地表温度快速下降<br>Soil surface temperature decreases rapidly                            | $0.17 \pm 0.33$                                          | $253.31 \pm 146.12$            |



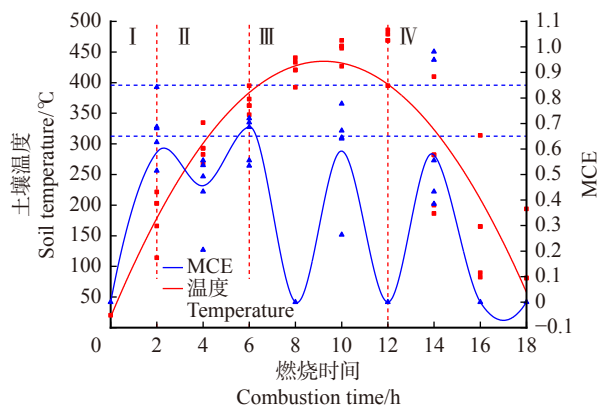


图 2 阴燃过程中的土壤表层温度及 MCE 值变化

Fig. 2 Surface temperature of soil and MCE in the smouldering combustion process

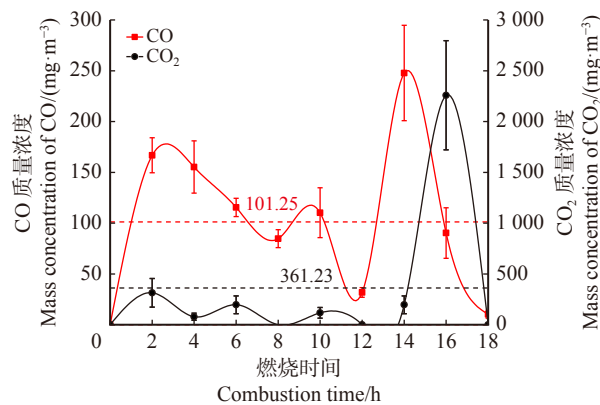


图 3 阴燃过程中的 CO<sub>2</sub> 和 CO 释放

Fig. 3 Emission of CO<sub>2</sub> and CO during the smouldering combustion process

表 3 燃烧时间对 CO<sub>2</sub> 和 CO 释放量的影响  
(单因素分析)

Tab. 3 Effects of combustion time on the emission of CO<sub>2</sub> and CO (one-way ANOVA test)

| 气体种类 Gas type   | df | F     | P     |
|-----------------|----|-------|-------|
| CO <sub>2</sub> | 8  | 2.946 | 0.013 |
| CO              | 8  | 2.843 | 0.017 |

在 20%~40% 范围内,因此在阴燃炉实验中,分析了 20%、30% 和 40% 3 个含水率下的 CO<sub>2</sub> 和 CO 释放量。实验结果显示(图 4),不同含水率下,CO<sub>2</sub> 释放量差异性显著( $P=0.001$ ,  $P<0.05$ ),CO<sub>2</sub> 释放量随着含水率上升而减小,但不同含水率下的 CO<sub>2</sub> 释放量均高于 CO 释放量。20% 和 30% 含水率时的 CO<sub>2</sub> 释放量无显著性差异;40% 含水率时的 CO<sub>2</sub> 释放量与 20%、30% 含水率时的 CO<sub>2</sub> 释放量均存在显著性差异。与 CO<sub>2</sub> 不同,不同含水率时的 CO 释放量无显著性差异( $P=0.265$ ,  $P>0.05$ ),20% 和 40% 含水率时的 CO 释放量接近,30% 含水率时的 CO 释放量最大。

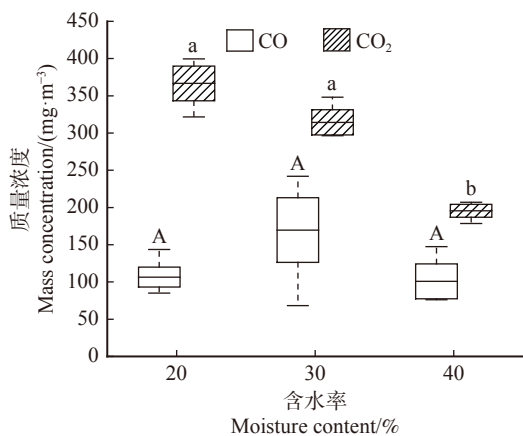


图 4 不同含水率下 CO<sub>2</sub> 和 CO 释放量差异性分析

Fig. 4 Difference analysis on the emission of CO<sub>2</sub> and CO of different water contents

### 3 讨 论

#### 3.1 阴燃温度变化特征

一般认为,阴燃过程主要发生热解和氧化还原反应,这是由于可燃物内部多孔疏松,存在部分氧气,因此可燃物受热后,发生热解反应,生成可燃气体和炭;热解生成物与氧气进行氧化反应,生成气体和焦炭等,并放出热量以维持阴燃蔓延<sup>[10]</sup>。但由于阴燃涉及复杂的物理化学过程,MCE 等常用于分析燃烧机制的简单指标难以解释阴燃温度变化和蔓延过程,目前,温度变化、质量损失、碳释放等指标常用于研究阴燃蔓延机制<sup>[23]</sup>。

根据课题组前期研究成果和本实验中对气体释放的研究,阴燃前期主要为热解反应和氧化还原反应,释放大热量并伴随土壤水分蒸发,为后续阴燃蔓延传播蓄积足够热量,即点燃期<sup>[24]</sup>;之后热解反应占主导地位,热量向外扩散,形成自维持传播阶段<sup>[25]</sup>,根据该阶段内温度的变化梯度,又可以分为上升期和稳定期;之后由于可燃物的消耗和热量的散失,阴燃无法维持,进入熄灭期。

#### 3.2 气体释放特征

本次阴燃实验过程中,4、8 和 12 h 的 CO<sub>2</sub> 释放量接近于零,虽然实验采用的气体检测设备灵敏度会对气体检测结果有一定影响,但与其他类型森林火灾的持续性高浓度 CO<sub>2</sub> 释放量相比<sup>[26]</sup>,阴燃过程中的 CO<sub>2</sub> 释放具有特殊性。另外,阴燃上升期和稳定期的 CO<sub>2</sub> 释放量均低于点燃期,这主要是由于阴燃过程中氧气含量较低,而氧气浓度会影响阴燃中

的热解和氧化还原过程,土壤中的氧气在点燃期被消耗又得不到及时补充,导致上升期和稳定期燃烧不完全,CO<sub>2</sub> 释放量较低<sup>[27-28]</sup>。进入熄灭期后,CO<sub>2</sub> 释放量在 16 h 处出现显著跃升,质量浓度高达 2 258.75 mg/m<sup>3</sup>,这是由于阴燃同时存在横向和纵向蔓延<sup>[18]</sup>,并随着蔓延传播和空气流动,会在地表交界处出现向明燃转化的趋势<sup>[29]</sup>。杨玖玲<sup>[8]</sup>关于阴燃气体生成规律的研究也指出,氧气浓度达到一定值后,CO<sub>2</sub> 释放量会在阴燃后期迅速上升至最大峰值。另外,16 h 处的 MCE 值约为 0.95,远高于其他阴燃阶段,也能说明阴燃逐渐向明燃转变,但由于阴燃炉中可燃物消耗殆尽,无法维持燃烧所需的热量<sup>[30]</sup>,因此阴燃逐渐熄灭,在 18 h 处已经检测不到 CO<sub>2</sub> 释放。

本次阴燃实验中持续监测到高浓度的 CO,且在上升期、稳定期和熄灭期,均出现 CO 释放量峰值。阴燃 2 h 左右即出现第一个 CO 峰值,这是由于半分解层质地松软且富含有机质,有助于阴燃蔓延,因此释放出高浓度的 CO<sup>[22]</sup>; 2~8 h 的 CO 释放量逐渐降低,分析是由于阴燃蔓延缓慢,发生阴燃的位置可燃物含量逐渐下降,得不到及时补充导致的<sup>[31]</sup>; 10 h 处出现了 CO 释放量第二个峰值,研究认为,这与 10 h 处阴燃温度达到最高值(> 400 ℃),从而加速有机质分解有关<sup>[32]</sup>; 熄灭期 14 h 处,CO 释放量达到最大值,分析同样是由于阴燃后期,阴燃蔓延至地表交界处,氧气含量相对较高,从而加速了阴燃速率导致的<sup>[33]</sup>。

### 3.3 含水率对气体释放的影响

本研究发现,阴燃 CO<sub>2</sub> 释放量随土壤含水率增加而降低,且含水率为 40% 使 CO<sub>2</sub> 释放量显著下降,主要是由于蔓延速度和氧气含量的变化导致的。由于水的比热容大,减缓了阴燃的热量累积,且水的蒸发会导致热量损失,影响热解反应和氧化反应,相关研究已经发现<sup>[34-35]</sup>,阴燃蔓延速度和燃烧速率会随着含水率的增加而降低。另外,含水率较低时,地下可燃物中的氧气浓度较高<sup>[36]</sup>,从而有利于充分燃烧,CO<sub>2</sub> 释放量增加。

本研究中,含水率对阴燃过程 CO 释放量无显著影响,分析认为,虽然含水率增加会减弱热解和氧化反应,但有研究显示,在高含水率条件下,仍会产生阴燃现象,并且能够维持阴燃蔓延传播<sup>[11]</sup>。者香通过研究不同含水率对阴燃的影响发现,虽然含水率增加会降低阴燃蔓延速度,但不同含水率下的阴燃内部温度特征具有相似性<sup>[37]</sup>,仍可以维持可燃物的不完全燃烧,释放大量的 CO<sup>[38]</sup>。

## 4 结 论

(1)阴燃过程中,土壤温度呈现先快速增加,然

后保持平稳,最后快速下降的变化趋势。但由于阴燃蔓延传播机制复杂,常用于描述燃烧状态的 MCE 值无法有效描述阴燃蔓延过程。(2)阴燃过程中,CO 呈现持续释放状态,CO<sub>2</sub> 呈现间歇性释放状态;CO<sub>2</sub> 平均释放量高于 CO 平均释放量,且二者间不存在相关关系。(3)不同含水率下,CO<sub>2</sub> 释放量差异显著,但 CO 释放量无显著性差异。

### 参 考 文 献

- [1] El-Sayed S A, Abdel-Latif A M. Smoldering combustion of dust layer on hot surface[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, 13(6): 509-517.
- [2] Drysdale D. An introduction to fire dynamics [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2011.
- [3] Hatch L E, Luo W, Pankow J F, et al. Identification and quantification of gaseous organic compounds emitted from biomass burning using two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, 15: 1865-1899.
- [4] Rein G. Smouldering combustion//The SFPE handbook of fire protection engineering [M]. New York: Springer, 2015: 581-603.
- [5] Page S E, Siegert F, Rieley J O, et al. The amount of carbon released from peat and forest fires in Indonesia during 1997[J]. *Nature*, 2002, 420: 61-65.
- [6] 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 M X, Wang Y J, Wang F Q, 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.
- [7] 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.
- [8] 杨玖玲. 泥炭阴燃及阴燃气体生成规律的实验与机理研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.  
Yang J L. Experimental and theoretical study on the behavior and gas products of smoldering of peat[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [9] Cancellieri D, Leroy-Cancellieri V, Leoni E, et al. Kinetic investigation on the smouldering combustion of boreal peat[J]. *Fuel*, 2012, 93: 479-485.
- [10] Huang X, Rein G. Smouldering combustion of peat in wildfires: inverse modeling of the drying and the thermal and oxidative decomposition kinetics[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(6): 1633-1644.
- [11] Huang X, Rein G. Computational study of critical moisture and depth of burn in peat fires[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2015, 24(6): 798-808.
- [12] 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.

- [13] Benscoter B, Thompson D, Waddington J, et al. Interactive effects of vegetation, soil moisture and bulk density on depth of burning of thick organic soils[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2011, 20(3): 418–429.
- [14] Prat-Guitart N, Rein G, Hadden R M, et al. Propagation probability and spread rates of self-sustained smouldering fires under controlled moisture content and bulk density conditions[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2016, 25(4): 456–465.
- [15] 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: 169–177.
- [16] Huang X, Rein G. Downward spread of smouldering peat fire: the role of moisture, density and oxygen supply[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2017, 26: 907–918.
- [17] 尹赛男, 杜帅, 单延龙, 等. 兴安落叶松人工林腐殖质阴燃燃烧温度变化特征研究[J]. *生态学报*, 2021, 42(8): 3123–3130.  
Yin S N, Du S, Shan Y L, et al. Characteristics of humus smoldering combustion temperature changes in *Larix gmelinii* plantation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 42(8): 3123–3130.
- [18] 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.
- [19] Wang C. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests[J]. *Ecology and Management*, 2006, 222(1–3): 9–16.
- [20] Pechony O, Shindell D T. Driving forces of global wildfires over the past millennium and the forthcoming century[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(45): 19167–19170.
- [21] Akagis S K, Yokelson R J, Wiedinmyer C, et al. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2011, 11(9): 27523–27602.
- [22] Hu Y Q, Christensen E, Restuccia F, et al. Transient gas and particle emissions from smouldering combustion of peat[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2018, 37: 1–8.
- [23] Hu Y Q, Fernandez-Anez N, Smith T E L, et al. Review of emissions from smouldering peat fires and their contribution to regional haze episodes[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2018, 27: 293–313.
- [24] Ohlemiller T. Modeling of smoldering combustion propagation[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1985, 11: 277–310.
- [25] 韩喜越, 李旗, 高博, 等. 兴安落叶松人工林浅层地下火燃烧特征及发生概率研究[J]. *北京林业大学学报*, 2022, 44(2): 47–54.  
Han X Y, Li Q, Gao B, et al. Combustion characteristics and occurrence probability of shallow underground fire in *Larix gmelinii* plantation[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(2): 47–54.
- [26] Surawskin N C, Sullivan A L, Meyer C P, et al. Greenhouse gas emissions from laboratory-scale fires in wildland fuels depend on fire spread mode and phase of combustion[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(16): 23125–23160.
- [27] Hadden R M, Rein G, Belcher C M. Study of the competing chemical reactions in the initiation and spread of smouldering combustion in peat[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 2547–2553.
- [28] Rein G, Cohen S, Simeoni A. Carbon emissions from smouldering peat in shallow and strong fronts[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32: 2489–2496.
- [29] 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 transformation of forest humus from smoldering to flaming[J]. *Fire Science and Technology*, 2018, 37(9): 1162–1166.
- [30] 王秋华. 森林火灾燃烧过程中的火行为研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.  
Wang Q H. Study on fire behaviors in forest burning[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.
- [31] Sikkink P G, Jain T B, Rearrdon J, et al. Effect of particle aging on chemical characteristics, smoldering, and fire behavior in mixed-conifer masticated fuel[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 405: 150–165.
- [32] Frandsen W H. Heat evolved from smoldering peat[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 1991, 1(3): 197–204.
- [33] 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.  
Li Y J. Experimental study on the transformation of forest humus from smoldering to flaming[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.
- [34] Frandsen W H. The influence of moisture and mineral soil on the combustion limits of smoldering forest duff[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, 17(12): 1540–1544.
- [35] 者香, 赵伟涛, 陈海翔. 含水率对泥炭阴燃速率的影响[J]. *燃烧科学与技术*, 2016, 22(2): 136–140.  
Zhe X, Zhao W T, Chen H X. Influence of moisture content on spreading rate of peat smoldering[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2016, 22(2): 136–140.
- [36] Huang X, Restuccia F, Gramola M, et al. Experimental study of the formation and collapse of an overhang in the lateral spread of smouldering peat fires[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 168(26): 393–402.
- [37] 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.
- [38] 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.

(责任编辑 范娟  
责任编辑 臧润国)