·森林资源建设与保护 Construction and Protection of Forest Resources·

基于室内点烧试验的红松不同密度与冠层间距下双冠层树冠火水平蔓延规律

高江雪，胡同欣*，孙龙，杜意民，齐振博，陈伯轩，范佳乐
（东北林业大学 林学院，哈尔滨 150040）

摘 要：树冠火是破坏性极强的森林火灾，但其在多冠层结构中的蔓延机制尚不明确。为此，以高火险的红松人工林为研究对象，在室内静风环境下，通过开展可控的双层冠树冠火点烧试验，揭示水平间距与冠层密度对双冠层树冠火蔓延行为与燃烧强度的耦合调控机制，以期为精细化火灾模型和防控策略提供理论依据。试验以2个冠层的密度与冠层间的水平间距为核心变量，均设置3个梯度。使用热电偶阵列和热流计同步测量冠层内部的温度场、热流密度及火焰前锋到达时间。所有工况均进行有效重复，并设置地表火蔓延与绝热对照组。研究结果表明，1）辐射传热是冠层间（无火焰直接接触）能量传递的主导机制，其热流占比稳定在40%~46%；2）系统存在明确的控制机制转换，火蔓延过程随间距减小出现从燃料控制向传热控制的机制转换；3）第二个冠层的引燃存在一个明确的温度阈值（250 ℃），且其前缘温度可作为有效的实时预测指标；4）第一个冠层的热流密度对系统整体火行为具有非线性强化作用，存在最佳配比与明确的过载临界值，超过临界值后减弱；5）在第一个冠层影响下，未引燃的第二个冠层二次点燃后温度有50%的频率显著超越自然蔓延的强度上限（最高超出105.63 ℃），实现燃烧性能提升。这表明树冠火受多因子影响的复杂性，任何旨在精准预测的模型都必须考虑冠层结构相互作用的非线性机制。

关键词：树冠火；火行为；水平双冠层；可燃物密度；辐射热流；红松人工林
中图分类号：S762.1 **文献标识码：**A **DOI：**10.7525/j.issn.1006-8023.2026.05.002

Horizontal Spread of Crown Fires in a Dual-Layer *Pinus koraiensis* Canopy: Effects of Bulk Density and Canopy Gap Width Revealed through Controlled Ignition Experiments

GAO Jiangxue, HU Tongxin*, SUN Long, DU Yimin, QI Zhenbo, CHEN Boxuan, FAN Jiale
(School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: Crown fires are among the most destructive forest forms of wildland fire, however, their spread mechanisms within multi-layer canopy structures remain insufficiently understood. Therefore, this work focused on *Pinus koraiensis* plantation, characterized by high crow fire susceptibility. Through a series of controlled laboratory experiments, we investigated the coupled regulatory effects of horizontal canopy spacing and canopy bulk density on crown fire spread behavior and burning intensity in a dual-layer canopy system, with the aim of providing a theoretical basis for refined fire modeling and prevention strategies. Experiments were conducted in a wind-free indoor environment, and the research was carried out through controlled dual-layer canopy crown fire burning experiments. The primary variables were the bulk density loads of two canopies and the horizontal spacing between canopy elements, each examined at three gradient levels. A thermocouple array and heat flux sensors were deployed to simultaneously measure internal temperature fields, radiant heat flux density, and flame front arrival times. All experimental conditions were fully replicated, with surface fire spread and adiabatic configurations included as control groups for comparison. Under calm wind and laboratory small-scale conditions, the research results indicated that: (1) radiant heat transfer was the dominant mechanism for energy

收稿日期：2025-12-30
基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFC3003002)；黑龙江省重点研发计划项目(ZZDYF250100002)。
第一作者简介：高江雪，硕士研究生。研究方向为森林防火。E-mail：gaojiangxue@foxmail. com
***通信作者：**胡同欣，博士，教授。研究方向为林火生态与管理。E-mail：htxhtx@nefu. edu. cn
引文格式：高江雪，胡同欣，孙龙，等. 基于室内点烧试验的红松不同密度与冠层间距下双冠层树冠火水平蔓延规律[J]. 森林工程，2026，42(5)：893-907.
Gao Jiangxue, Hu Tongxin, Sun Long, et al. The horizontal spread of crown fire with different fuel loads in a dual-layer canopy of *Pinus koraiensis* based on indoor burning experiments[J]. Forest Engineering, 2026, 42(5): 893-907.

transfer between canopies (without direct flame contact), and the proportion of heat flow remained stable at 40%-46%. (2) There was a clear control mechanism transition in the system. As the spacing decreased, the fire spread processed transitions from fuel control to heat transfer control mechanism. (3) There was a clear temperature threshold for the ignition of the second canopy (250 ℃), and the front edge temperature can serve as an effective real-time prediction indicator. (4) The heat flux density of the first canopy had a nonlinear reinforcing effect on the overall fire behavior of the system. There was an optimal ratio and a clear overload critical value, and it weakened after exceeding the critical value. (5) Under the influence of the first canopy, the reignited second canopy showed a 50% probability of its temperature significantly exceeding the intensity ceiling of natural spread (up to 105.63 ℃ higher), achieving enhanced combustion performance. This illustrates hte complexity of crown fire as a multi factor systyem, indicating that any model aimed at precise prediction must take into account the nonlinear mechanisms of the interactions among the canopy structures.

Keywords: Crown fire; fire behavior; horizontally arranged dual-layer canopy; bulk density; radiant heat flux; *Pinus koraiensis* plantation

0 引言

树冠火是林冠层着火的森林火灾类型,其燃烧机理非常复杂[1-3],常与地表火同时发生,对森林的破坏性大[4-5]。树冠火一旦发生,扑救比较困难,导致森林被大面积烧毁,损失惨重[6-7]。

目前,国内外学者针对树冠火发生发展过程展开了很多的理论、试验和数值模拟研究。早期研究侧重于识别并量化独立关键变量的影响,通过控制试验或定向观测来实现。例如,Tachajapong等[8]定量证实了冠层基部高度是抑制火势垂直发展的首要因素,中低风速因夹卷冷空气而产生冷却作用,降低树冠火点火成功率。Cruz等[9]和Stocks等[10]的试验所得数据用以验证和改进现有的树冠火行为理论和经验模型,用于研究区内火蔓延研究。阐明不同树种可燃物属性对火行为的决定性作用,例如Thomas等[11]的研究表明冠层可燃物的关键属性(如叶片形态、空间分布及叶片面积指数)因树种不同而存在显著差异。这些差异直接导致了林冠可燃物密度、结构及连续性的不同,进而显著影响着潜在的火行为。其模型模拟指出,即使在平均风速条件下,不同树种林分也均能维持活跃的树冠火。随着认知深入,研究焦点转向可燃物垂直结构的核心作用,例如张思玉等[12]的研究表明,火灾行为与其可燃物的垂直结构紧密相关,可燃物载负荷量垂直分布的连续性决定了在未达到起燃阈值前,系统保持稳定不易起火;而一旦被引燃,该结构会立即促进火焰垂直蔓延,促使火灾迅速发展为高强度的树冠火。近年来,研究方法趋于多尺度综合。例如,吴清松等[13]的研究表明,水分蒸发过程会显著吸收能量,从而延缓甚至抑制树冠火的蔓延;可燃物中有机物的热解过程提供可燃气体、维持和加速火焰传播。张景群等[14]研究表明,树冠最大密度层的密度是评估潜在火险的关键指标,而针阔混交林因各树种主林冠层错位分布导致该密度较低,从而能有效抑制树冠火的连续蔓延。刘冠宏[15]针对典型林分的地表火蔓延及其向树冠火转化的机制问题,通过综合研究表明,地表火蔓延速率随可燃物含水率升高而降低,随近地表风速增大而加快;在地表火引燃树冠火的过程中,第一枝下高较高、树木绝对含水率较大的样树,反而表现出更高的树冠火发生概率。

针叶林树木的自身器官内富含极易燃的挥发性油脂,良好的可燃物连续性是引起针叶林树冠燃烧的主要原因[16-18]。黑龙江省是森林火灾的重灾区,年均森林火灾发生次数及过火面积居全国前列,红松人工林是该地区主要的森林类型之一,具有很高的经济价值[19]。且其枝叶内油脂含量较高,因此,具有极高的火灾风险[20-21]。然而,现有研究对树冠火的系统认识,主要集中于“单层冠层”或“地表火引燃冠层火”的垂直蔓延过程。对于真实森林中常见的结构如水平方向相邻的多个冠层之间(即双/多层冠层系统)的火蔓延行为,当前认识尚不充分[22-26]。多树冠冠层结构对于树冠火行为影响研究甚少,故本研究以双树冠冠层结构中的密度和间距作为参量进行变化,对树冠火行为的影响进行探究,以期为火灾防控策略的优化提供理论参考和数据支持。

1 研究方法与试验设计

1.1 研究区概况及样地调查

1.1.1 研究区概况

研究区位于帽儿山林场,地理坐标为127°18′0″~127°41′6″E,45°2′20″~45°18′16″N,位于黑龙江省尚志市西北部,隶属于尚志国有林场管理局,行政区域属帽儿山镇。林场地处张广才岭西坡,境内以山区丘陵地貌为主。施业区内坡度较缓,大部分坡度在5°~25°[27],地势南高北低,平均海拔400 m。属中温带大陆性季风气候,冬季漫长、寒冷而干燥,多西北风,夏季温热短促、降雨集中,早春少雨易干旱,秋季降温迅速,

常有冻害发生[28-29]。该地林场常见乔木有40余种,主要包括红松(*Pinus koraiensis*)、兴安落叶松(*Larix gmelinii*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、黄檗(*Phellodendron amurense*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongholica*)、山杨(*Populus davidiana*)及白桦(*Betula platyphylla*)等。

1.1.2　样地调查

2024年秋季防火期于帽儿山试验林场设置20 m×20 m的样地,调查样地内可燃物床层的厚度、地表载量及树冠密度等特征。采用标准地和可燃物负荷量(生物量)的调查方法,同时测定标准地区域的地形特征、海拔和林分郁闭度等。林木定位调查对每一个5 m×5 m大样方中的林木,分树种对样方内所有林木进行每木检尺。在样地中通过五点取样法划分出5个0.25 m×0.25 m的样方,调查样方内的地表可燃物床层厚度及密度,取其平均值作为该样地实际调查数据,按此方法共进行3个红松人工林样地调查,样地基本信息见表1。

表1　样地基本信息调查

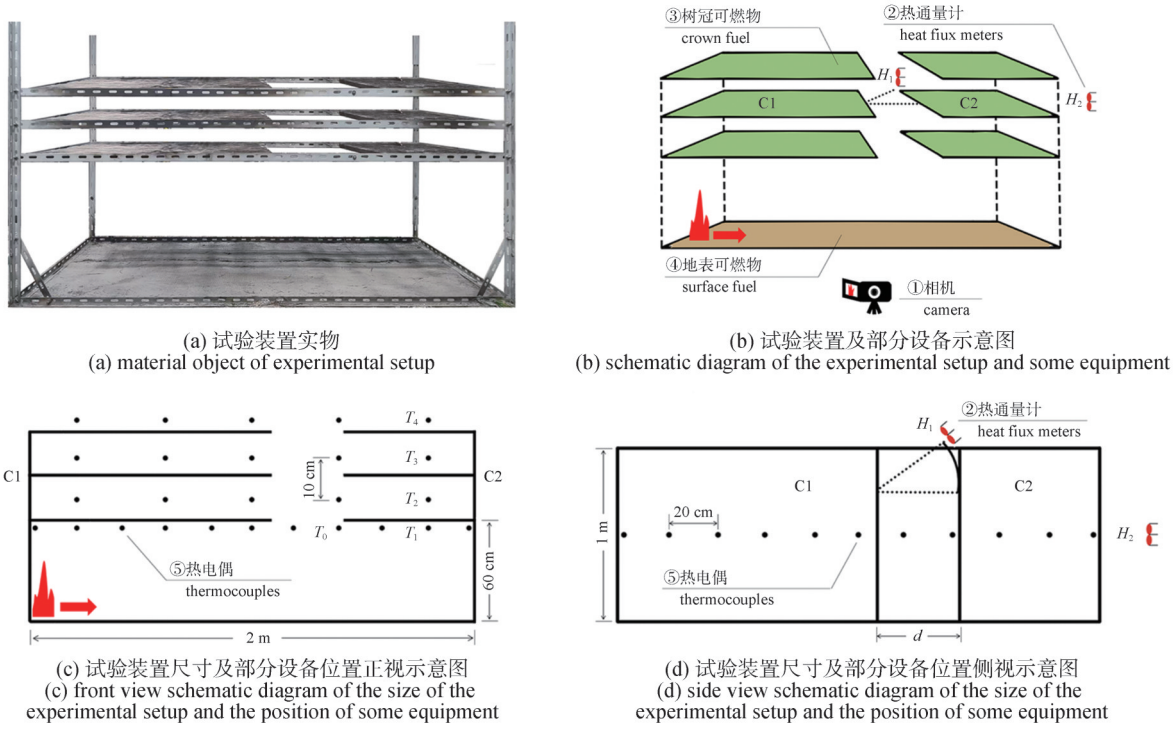
Tab. 1　Basic information survey of sample plots

样地编号 sample plot number	树高/m tree height	胸径/cm diameter at breast height	郁闭度 canopy density	地表可燃物密度/(kg·m^{-2}) surface fuel bulk density	可燃物含水率/% fuel moisture content
1	16.1 ± 2.4	21.7 ± 1.9	0.7	0.9 ± 0.1	13.9 ± 0.4
2	18.3 ± 1.2	22.1 ± 3.1	0.8	0.9 ± 0.1	17.7 ± 0.9
3	23.3 ± 1.5	26.4 ± 2.6	0.9	1.0 ± 0.1	20.8 ± 0.6

1.2　试验设计

1.2.1　试验装置

试验装置架设在石棉板燃烧台上,由1 m×2 m的矩形板构和1 m×0.5 m×1 m的网状铁架及若干角钢组成。K型热电偶测量空气温度,沿装置中心线安装在树冠可燃物下方及内部各处;格恩泰便携式热流传感器测量冠层燃烧的热流密度(分为总热流密度和辐射热流密度),传感器的顶面朝上,与铁架的中间面齐平。索尼4 K数码摄像机和菲力尔E5红外摄像机分别放置在燃烧台的侧方,用于记录火蔓延过程,具体布置见图1[30-31]。



(a) 试验装置实物
(a) material object of experimental setup

(b) 试验装置及部分设备示意图
(b) schematic diagram of the experimental setup and some equipment

(c) 试验装置尺寸及部分设备位置正视示意图
(c) front view schematic diagram of the size of the experimental setup and the position of some equipment

(d) 试验装置尺寸及部分设备位置侧视示意图
(d) side view schematic diagram of the size of the experimental setup and the position of some equipment

C1. 树冠1;C2. 树冠2;H_1、H_2. 热通量计测点;T_0、T_1、T_2、T_3、T_4. 热电偶测点;d. 间距。

C1. Canopy1; C2. Canopy2; H_1、H_2. Heat flux meters point; T_0、T_1、T_2、T_3、T_4. Thermocouples point; d. spacing.

图1　试验装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the experimental setup

1.2.2 试验分组

本试验以2个冠层可燃物密度、2个冠层的间距为控制变量。样地可燃物密度信息调查和预试验表明，地表可燃物在23%以上含水率时，无法产生稳定持续蔓延的火焰，故地表可燃物含水率不设梯度，固定为10%，误差控制在±0.5%；C1的密度(C_1)、C2的密度(C_2)各设置3个梯度(2.5、5.0、7.5 kg/m^3)；冠层之间的间距设置3个梯度(150、300、450 mm)，并设置地表火蔓延和郁闭度的对照试验。

为验证关键物理现象的可重复性，每个试验条件组合均进行了2次独立的物理重复试验。C1密度的3个梯度与C2密度的3个梯度以及3种不同间距(d)进行全因子交叉组合，共形成27种试验条件(3×3×3)，每种条件重复2次；此外，另设地表火蔓延空白对照试验(重复2次)以及石棉布冠层1郁闭度绝热对照试验(涵盖3种间距，各重复2次)。以上合计完成62场独立有效的点烧试验。

1.2.3 试验步骤及数据采集

本试验采用线形引燃，将与地表可燃物床层同宽、浸酒精的棉线置于床层一端，使用点火器多点引燃棉线。火焰进入似稳态后，用热电偶法采集数据：当地表热电偶读数达270 ℃、冠层热电偶读数210 ℃，记为火焰前锋到达时刻；若C2被成功引燃则不予干预，如未成功引燃则待地表火蔓延终止后，采用人工方式引燃C2，为保证二次引燃前条件一致，均待地表火完全熄灭且无阴燃后进行操作，采用线形引燃，以与树冠可燃物床层同宽、浸酒精的棉线置于第二个冠层前端下沿实现，以获取其完整的燃烧特性数据；为减小试验误差，所有点烧试验均选择在相同的天气条件下进行[21,30]。

地表热电偶组和冠层热电偶组布置在燃烧床中心线位置，该布置基于火焰燃烧过程主要发生在中心区域的现象，旨在获取能够代表燃烧状态的特征温度。T_0测点位于C2前端下缘，该位置为一个关键特征区域。此区域接收来自多方向的热传递，包括地表火对C2的热对流与热辐射，以及C1燃烧对C2的热辐射与热对流。T_1、T_2、T_3、T_4分布式布置在C2内部，其功能是记录C2燃烧过程中的内部火焰温度。

H_1固定在C1火焰中心距离C2边缘同等距离处，其测量目标是记录C2所接收到的来自C1燃烧的热流。H_2设置在C2后方中心线上，与C1、C2间距的同等距离处。通过对比H_1(反映未受冠层影响的冠层火热辐射)与H_2(反映经C2影响后的冠层火热辐射)的数值，可将其作为对照组数据进行对比分析。

在每次物理试验中，通过高频同步采集系统对温度、热流等参数进行连续测量，单次试验即可为每个参数生成上千个高时间分辨率的数据点。

1.3 样品采集及制备

1.3.1 样品采集

为保持可燃物均一性，待林下凋落层干燥时一次性采集试验所需全部凋落物(剔除腐殖质及半腐殖质)，以编织袋盛装后运回通风贮藏室。所获样品含水率为10%~25%，贮存期间每日翻动，保持库内湿度与温度稳定，维持地表可燃物含水率稳定，并拣除红松地表可燃物中混入的果实、枝条等杂质。枝条样本采集于东北林业大学帽儿山实验林场老山实验站后山，使用的新鲜活可燃物枝条样本于每次试验前上山采集，采集时需要测量含水率等基础数据，用于点烧试验的枝条采集长度应大于250 mm，采集后立刻送至试验室对其进行修剪，保证每次试验的枝条形态相似，随后进行试验。

1.3.2 样品制备

试验在东北林业大学森林草原火行为实验室内进行。每次试验前将门、窗关闭，排除气流对试验过程的干扰，保持静风状态。试验前准备冠层的新鲜枝叶，并使用大型鼓风干燥箱调节地表可燃物含水率，具体方法为：利用细水雾喷壶将可燃物均匀浸湿后静置，然后将其分层均匀松散放置在烘箱内烘干，温度设置为80 ℃，根据经验判断每隔一段时间开启烘箱使用AND ML-50快速水分测定仪测量样本含水率，当样品含水率符合试验条件时，进行点烧试验并进行记录。根据预设可燃物密度计算出所需实际含水率条件下的可燃物质量，利用精度为0.1 g的电子天平称取所需可燃物，用模拟落叶自然掉落的方式，在燃烧台上均匀铺设宽度1 m、长度2 m的矩形地表可燃物床层；在铁网上均匀铺设宽1 m、长1 m，组成C2的三层铁网上逐层均匀铺设宽1 m、长0.5 m的冠层可燃物。

2 结果与分析

2.1 C2引燃结果统计分析

由表2数据计算可得，C2的引燃频率为42.65%；在水平间距为450、300、150 mm的情况下，引燃频率分别为27.27%、20%、57.69%，在试验的尺度范围内，引燃频率并未随间距减小而单调增加，而是在150 mm处出现峰值，呈现出波动无明显单调的趋势。

在450 mm间距条件下，不论C_1是多少，在C_2的为2.50、7.50 kg/m^{3}时均不会被引燃；不论C_1是多少，在C_2为5 kg/m^{3}时均会被引燃。在300 mm间距条件下，C_1和C_2均为2.5、5.0 kg/m^{3}时，C2会被引燃；在C2为中高密度即5.0、7.5 kg/m^{3}且大于等于C_1时(除C_1=2.5 kg/m^3、

表 2　试验结果统计表

Tab. 2　Experimental result statistics table

试验编号 experiment number	d/mm	冠层含水率/% canopy moisture content	C_1/(kg·m^{-3})	C_2/(kg·m^{-3})	C2 引燃结果 C2 ignition result
1~4	450	49.86 ± 0.68	2.50	2.50	−,−,−,−
5~6	450	49.14 ± 1.06	5.00	2.50	−,−
7~8	450	50.78 ± 0.94	7.50	2.50	−,−
9~10	450	48.92 ± 1.64	2.50	5.00	+,+
11~13	450	51.57 ± 0.22	5.00	5.00	+,+
14~15	450	50.25 ± 1.70	7.50	5.00	+,+
16~17	450	49.61 ± 0.12	2.50	7.50	−,−
18~21	450	51.80 ± 1.24	5.00	7.50	−,−,−,−
22~23	450	48.35 ± 0.54	7.50	7.50	−,−
24~26	300	50.94 ± 1.88	2.50	2.50	+,+
27~28	300	49.29 ± 0.36	5.00	2.50	+,+
29~32	300	51.08 ± 1.14	7.50	2.50	+,−,−,+
33~34	300	48.60 ± 0.78	2.50	5.00	+,+
35~36	300	49.75 ± 1.44	5.00	5.00	−,−
37~38	300	50.12 ± 0.96	7.50	5.00	−,−
39~40	300	48.88 ± 1.62	2.50	7.50	−,−
41~42	300	52.00 ± 0.20	5.00	7.50	−,−
43~44	300	49.47 ± 1.38	7.50	7.50	−,−
45~46	150	51.66 ± 0.66	2.50	2.50	−,−
47~50	150	48.21 ± 1.74	5.00	2.50	−,−,−,+
51~52	150	50.58 ± 1.08	7.50	2.50	+,+
53~56	150	49.03 ± 0.08	2.50	5.00	+,+
57~60	150	51.95 ± 1.90	5.00	5.00	−,+,−,+
61~64	150	48.74 ± 0.42	7.50	5.00	+,−,−,+
65~68	150	51.27 ± 1.56	2.50	7.50	−,+,+,−
69~70	150	49.86 ± 0.84	5.00	7.50	+,+
71~72	150	50.39 ± 1.26	7.50	7.50	+,+

注:+. 引燃;−. 不引燃。

Note:+. Ignited;−. Unignited.

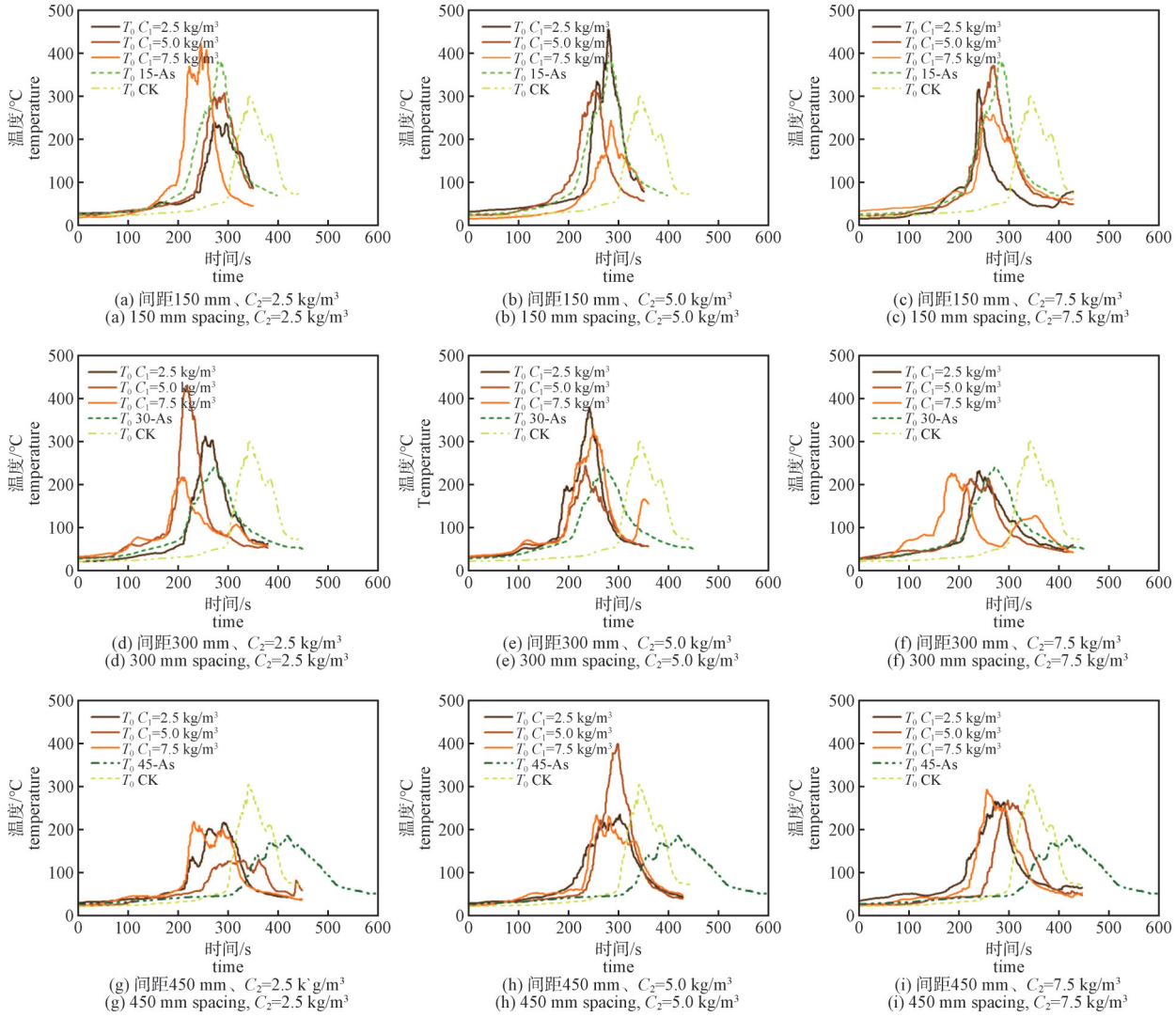
C_2=5. 0 kg/m^3;C_1=7. 5 kg/m^3、C_2=7. 5 kg/m^{3}外),C2 不会被引燃;在 C1 为高密度 7. 5 kg/m^{3}时,2. 5 kg/m^{3}的 C_2为引燃或不引燃的临界状态。在 150 mm 间距条件下,总体趋势上 C1 的密度越低,C2 越难被引燃,但 C_1= 2. 5 kg/m^3、C_2=5. 0 kg/m^{3}是一特例;大部分工况下,两树冠密度差异越大,C2 的引燃频率升高。与 450、300 mm 间距相比,150 mm 间距下 C2 的点燃趋势规律性减弱,呈现不确定特征。

以上数据显示,C2 的引燃频率主要受自身密度控制,即树冠火是否能完成从 C1 到 C2 的蔓延主要受自身密度控制;随着两个冠层间的间距变小,C2 自身载量的主导作用逐渐弱化,两个冠层之间的热传递对 C2 的引燃贡献增强。

2. 2　典型工况温度分析

2. 2. 1　C2 前端温度随时间变化分析

在图 2 中可以观察到,在各密度的 C1 冠层,地表火火焰前锋到达 T_0处的时间均提前于空白对照试验,说明冠层的燃烧对地表火蔓延具有普遍的加速作用;石棉布冠层在较大距离(450 mm)时反而会抑制地表火蔓延。



注：15-As. 间距为 150 mm 时的石棉布冠层对照试验；30-As. 间距为 300 mm 时的石棉布冠层对照试验；45-As. 间距为 450 mm 时的石棉布冠层对照试验；CK. 地表火蔓延空白对照试验。

Note: 15-As. Control experiment on an asbestos cloth canopy at a spacing of 150 mm; 30-As. Control experiment on an asbestos cloth canopy at a spacing of 300 mm; 45-As. Control experiment on an asbestos cloth canopy at a spacing of 450 mm; CK. Surface fire spread as the control group.

图 2 典型工况特征区温度随时间变化

Fig. 2 Characteristic zone's temperature curve in typical experiments

随着 C2 密度的增加，T_0 处的升温情况对 C1 密度变化的敏感性普遍降低。具体表现为，随着 C2 密度的增加温度曲线差异缩小（即重合度增高），削弱了 C1 燃烧的相对贡献。这说明 C2（活叶）在预热阶段蒸发水分所吸收的潜热产生了“热缓冲”，其密度越大，对 C1 燃烧产生的热量的抵消作用越强。

在 450 mm 间距下，T_0 温度随 C2 密度增加呈微弱正相关，整体变幅在 50 ℃以内；当间距减小至 300 mm 时，则转为显著的负相关；而在 150 mm 间距下，C2 密度的影响变得不显著。在相同 C2 密度下，T_0 的最高温度随间距减小呈现轻微的上升趋势，上升趋势随着 C2 密度的增加而略有减弱，进一步印证了 C2 的抑制性调节作用。

综上，T_0 处的最终温度由 3 个因素竞争决定：间距减小对 T_0 最高温度与火焰到达时间均产生促进作用；C1 密度对地表火蔓延速度具有普遍的加速作用，其对 T_0 升温过程的影响取决于 C2 密度水平，在低 C2 密度下，C1 的影响显著，但随着 C2 密度增加，其影响被急剧削弱，直至在高 C2 密度下变得不显著；C2 密度的变化对另外两个因子的作用产生了影响，其既降低了 T_0 升温对 C1 密度的敏感性，也轻微减弱了间距减小带来的升温趋势。最终形成“C1 驱动”与“C2 抑制”在特定间距条件下动态平衡的结果。各因素的影响强度并非固定，而是随系统状态（变量的取值）发生转变。

2.2.2　C2内部温度随时间变化分析

为量化不同工况下的典型高温水平,选取温度时间序列中的最大值,并计算其平均值,定义为平均峰值温度这一特征值(t_{char})。由图3可知,在450 mm间距条件下,C_1=2.50 kg/m^{3}时,t_{char}为114.62 ℃(C_2=2.50 kg/m^3)、518.29 ℃(C_2=5.00 kg/m^3)、128.23 ℃(C_2=7.50 kg/m^3);C_1=5.00 kg/m^{3}时,t_{char}为143.51 ℃(C_2=2.50 kg/m^3)、549.18 ℃(C_2=5.00 kg/m^3)、106.65 ℃(C_2=7.50 kg/m^3);C_1=7.50 kg/m^{3}时,t_{char}为192.48 ℃(C_2=2.50 kg/m^3)、669.33 ℃(C_2=5.00 kg/m^3)、148.83 ℃(C_2=7.50 kg/m^3)。

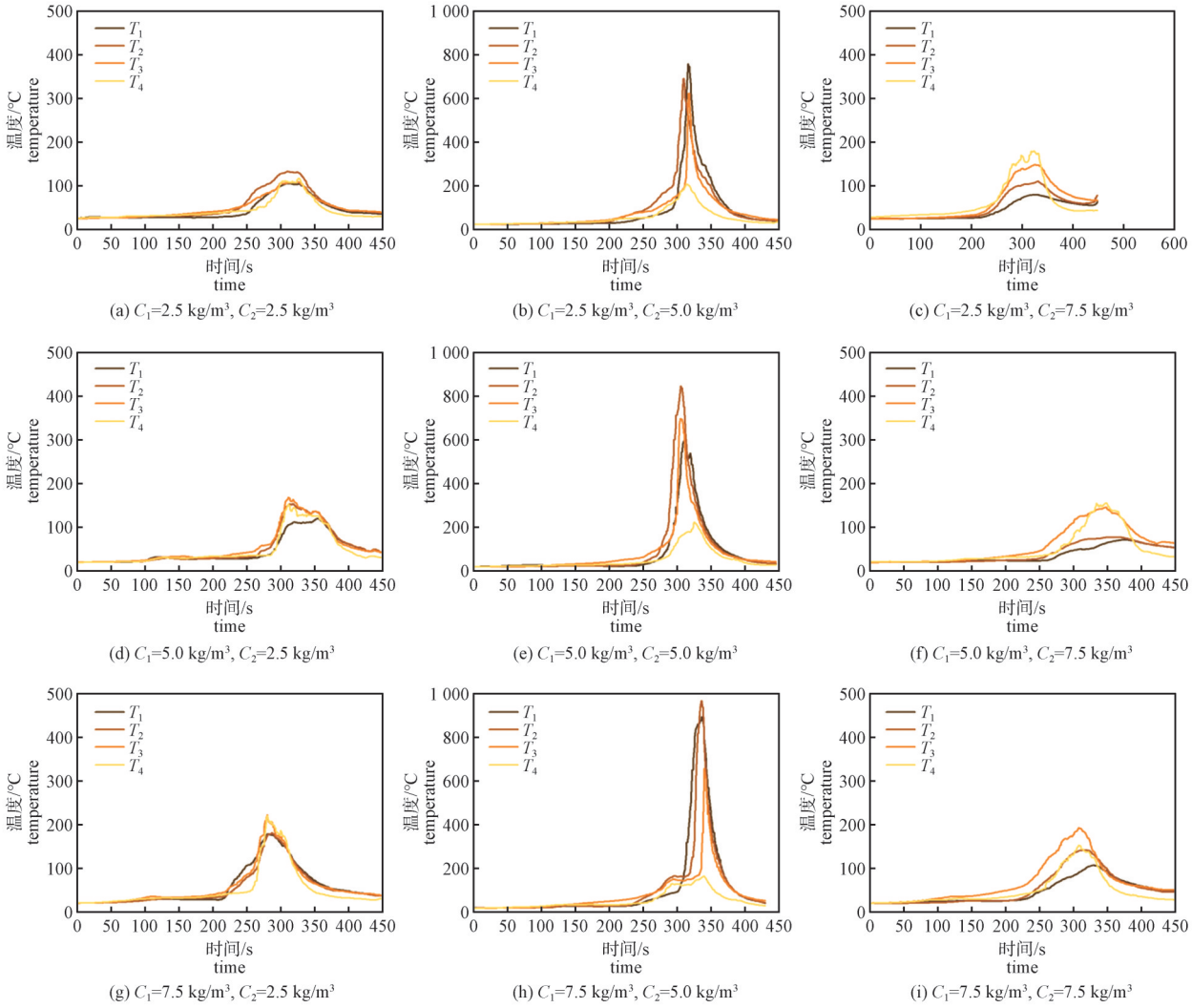


图3　间距为450 mm时典型工况C2内部温度随时间变化

Fig. 3　When the spacing is 450mm temperature curve in typical experiments inside C2

同一C1密度下,t_{char}均呈现出高度一致的非单调变化模式。具体表现为t_{char}在C_2=5.00 kg/m^{3}时出现峰值,而在C_2=2.50 kg/m^{3}和C_2=7.50 kg/m^{3}时均处于低位。当C_2=2.50 kg/m^3(低密度)与C_2=7.50 kg/m^3(高密度)时,t_{char}虽随C1增加有微弱上升,但始终被限制在低温水平(C2未被引燃、树冠火未蔓延),与高温水平存在200~500 ℃的温度断层,最高温和最低温分别是669.33 ℃和106.65 ℃;当C_2=5.00 kg/m^3(中等密度)时,t_{char}随C1密度的增加而单调增强。由此可见,C2密度是决定性控制因素,在本试验中,存在约为5 kg/m^{3}的特定范围,能最大化t_{char},且这一范围不受C1密度变化的影响。

由图4可知,在300 mm间距条件下,C_1=2.50 kg/m^{3}时,t_{char}为404.76 ℃(C_2=2.50 kg/m^3)、699.34 ℃(C_2=5.00 kg/m^3)、156.88 ℃(C_2=7.50 kg/m^3);C_1=5.00 kg/m^{3}时,t_{char}为450.28 ℃(C_2=2.50 kg/m^3)、142.36 ℃(C_2=5.00 kg/m^3)、169.23 ℃(C_2=7.50 kg/m^3);C_1=7.50 kg/m^{3}时,t_{char}为484.55 ℃(C_2=2.50 kg/m^3)、222.63 ℃(C_2=5.00 kg/m^3)、130.99 ℃(C_2=7.50 kg/m^3)。

t_{char}的分布可以明显分为两个组别,高温组(C_1=2.50 kg/m^3/C_2=2.50 kg/m^3, C_1=2.50 kg/m^3/C_2=5.00 kg/m^3, C_1=5.00 kg/m^3/C_2=2.50 kg/m^3, C_1=7.50 kg/m^3/C_2=

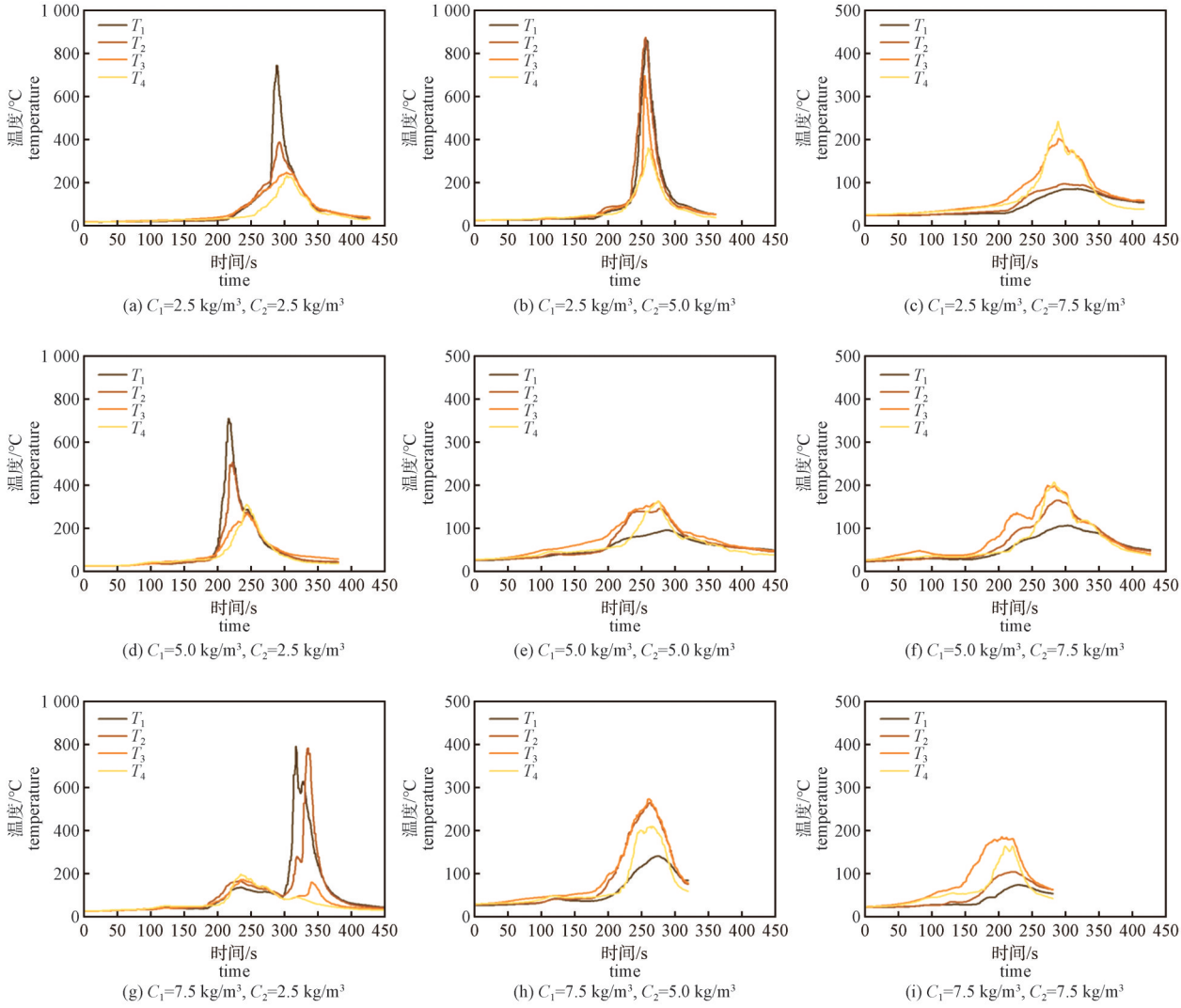


图 4 间距为 300 mm 时典型工况 C2 内部温度随时间变化

Fig. 4 When the spacing is 300 mm temperature curve in typical experiments inside C2

2.50 kg/m³）和低温组（C_1=2.50 kg/m³/C_2=7.50 kg/m³，C_1=5.00 kg/m³/C_2=5.00 kg/m³，C_1=5.00 kg/m³/C_2=7.50 kg/m³，C_1=7.50 kg/m³/C_2=5.00 kg/m³，C_1=7.50 kg/m³/C_2=7.50 kg/m³）。两组之间存在着一条非常清晰的、介于250~400 ℃的温度断层，最高温和最低温分别是699.34 ℃和130.99 ℃。数据表明，C2密度是决定系统处于高温或低温状态（C2是否被引燃、树冠火是否蔓延）的决定性因子，低C2密度（2.50 kg/m³）是实现高温状态的必要条件。

由图5可知，在150 mm间距条件下，C_1=2.50 kg/m³时，t_{char}为114.62 ℃（C_2=2.50 kg/m³）、518.29 ℃（C_2=5.00 kg/m³）、128.23 ℃（C_2=7.50 kg/m³）；C_1=5.00 kg/m³时，t_{char}为206.56 ℃（C_2=2.50 kg/m³）、245.40 ℃（C_2=5.00 kg/m³）、680.90 ℃（C_2=7.50 kg/m³）；C_1=7.50 kg/m³时，t_{char}为331.55 ℃（C_2=2.50 kg/m³）、521.00 ℃（C_2=5.00 kg/m³）、548.16 ℃（C_2=7.50 kg/m³）。

t_{char}的分布可以明显分为2个组别，低温组（C_1=2.50 kg/m³/C_2=2.50 kg/m³，C_1=5.00 kg/m³/C_2=2.50 kg/m³，C_1=7.50 kg/m³/C_2=2.50 kg/m³，C_1=2.50 kg/m³/C_2=7.50 kg/m³，C_1=5.00 kg/m³/C_2=5.00 kg/m³）和高温组（C_1=2.50 kg/m³/C_2=5.00 kg/m³，C_1=5.00 kg/m³/C_2=7.50 kg/m³，C_1=7.50 kg/m³/C_2=5.00 kg/m³，C_1=7.50 kg/m³/C_2=7.50 kg/m³）。两组之间存在着一条非常清晰的、介于350~500 ℃的温度断层，最高温和最低温分别是680.90 ℃和114.62 ℃。数据表明，当C2为低密度（2.50 kg/m³）时，燃烧过程特征温度被限制于350 ℃以下；只有当C2密度达到中高密度（5.00~7.50 kg/m³）水平时，才有可能（在与合适的C1密度组合下）被引燃。

基于上述发现，C2密度是决定系统温度水平（高或低）的主导因素，其设定了一个明确的温度区间。而C1密度与间距则在此区间内起到调节作用，仅能引起温度的有限增减，而无法突破由C2所设定的温度上限。

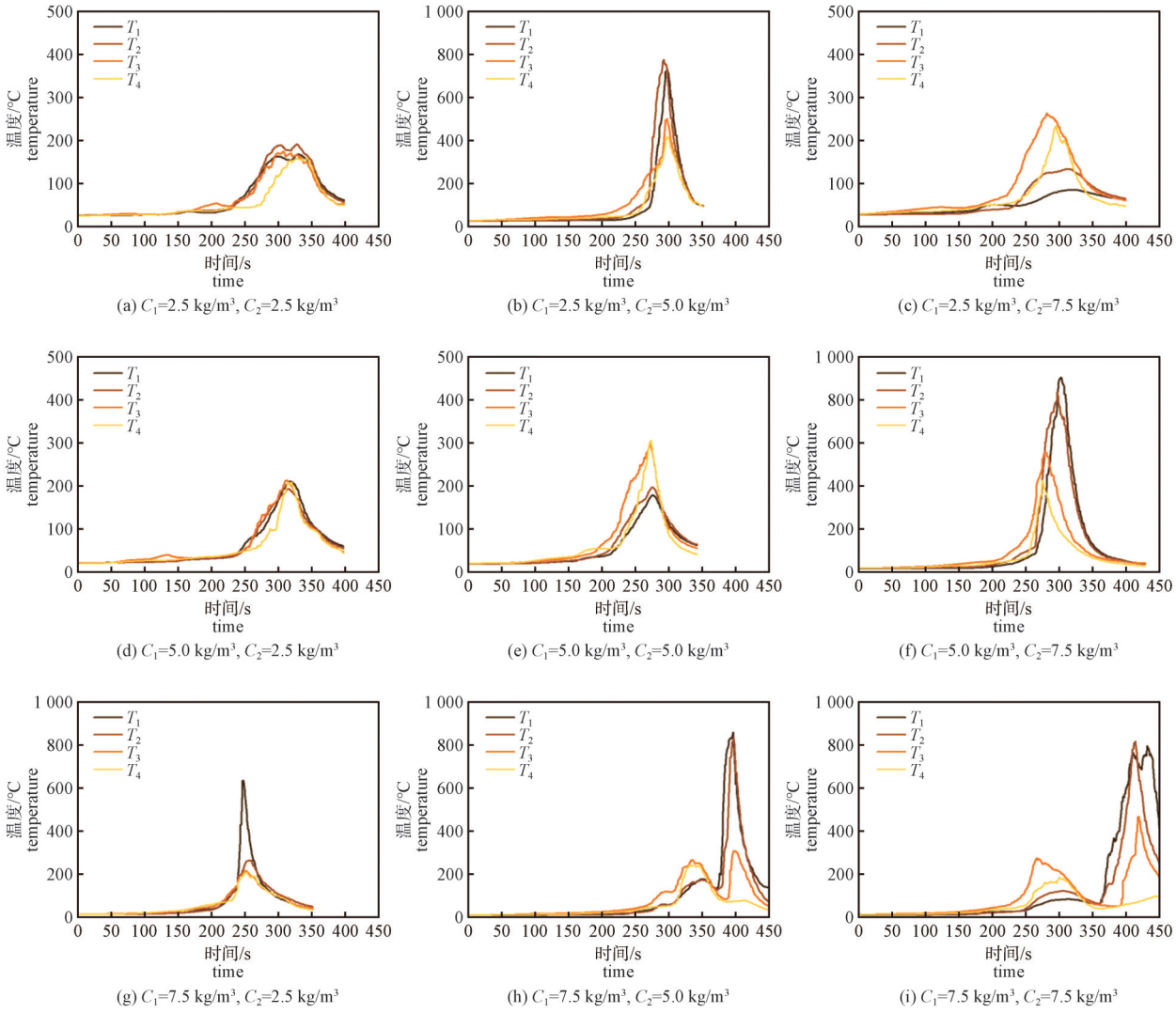


图 5　间距为 150 mm 时典型工况 C2 内部温度随时间变化

Fig. 5　When the spacing is 150 mm temperature curve in typical experiments inside C2

C2 燃烧在 3 个间距下的极差均稳定在 566~568 ℃,说明在不同间距条件下,整体动态范围未因间距改变而发生显著变化,整体温度跨度稳定。具体表现为,系统在中等间距(300 mm)下展现出最强的达到高温的能力,其最高温和最低温分别为 699. 34 ℃和 130. 99 ℃。而在近距离下(150 mm),最高温和最低温度分别从 669. 33 ℃和 106. 65 ℃(450 mm)提升至 680. 90 ℃和 114. 62 ℃,表明温度随距离减小而有升高趋势。

具体到间距不同的组别,450 mm(远距离)高温组出现的唯一条件是 C_2=5. 00 kg/m³,只要 C_2=5. 00 kg/m³,无论 C1 是多少,系统都处于高温组;300 mm(中距离)高温组出现的主要条件转变为 C_2=2. 50 kg/m³,在任何 C1 密度条件下,系统均处于高温组;150 mm(近距离)高温组出现的主要条件转变为 C_2≥5. 00 kg/m³,只要 C2 为 5. 00 kg/m³ 或 7. 50 kg/m³,系统都处于高温组。低温组由其他的组合组成。

数据结果表明,与系统高温状态对应的 C_2 密度随间距减小而变化,其值从远距离的 5. 00 kg/m³,转变为中距离的 2. 50 kg/m³,最终变为近距离的大于或等于 5. 00 kg/m³。低温组由在特定间距下无法达到高温状态的 C2 密度区间构成,该密度区间也随间距的改变而发生移动。

不同间距下高、低温组的分布规律表明,随着间距减小,触发高温模式所需的 C2 密度条件发生了根本性的逆转,不存在一个普适的 C2 最优密度。系统达到高温状态所要求的 C2 密度,强烈依赖于间距。其总体趋势是:随着间距减小,触发高温状态所需的 C2 密度从单一的中间值,先向低值移动,再向高值区间移动。这清晰地展示了间距作为一个关键环境变量,如何系统地调制着 C2 密度对燃烧温度的控制作用。进一步说明 300 mm 是系统燃烧行为发生此变化的过渡区间。

2.2.3 二次引燃工况内部温度分析

由图6可知，T_0点(C2前端下沿)未超过250 ℃的工况有：间距为450 mm时C_2=2.50 kg/m^3、C_1=2.50 kg/m^3/C_2=5.00 kg/m^3、C_1=7.50 kg/m^3/C_2=5.00 kg/m^3、C_1=2.50 kg/m^3/C_2=7.50 kg/m^3、C_1=5.00 kg/m^3/C_2=7.50 kg/m^{3}的工况；间距为300 mm时C_1=7.50 kg/m^3/C_2=2.50 kg/m^3、C_1=5.00 kg/m^3/C_2=5.00 kg/m^3、C_2=7.50 kg/m^{3}的工况；间距为150 mm时C_1=2.50 kg/m^3/C_2=2.50 kg/m^3、C_1=7.50 kg/m^3/C_2=5.00 kg/m^3、C_1=7.50 kg/m^3/C_2=7.50 kg/m^{3}的工况，共计15个，占所有工况的5/9。除间距为300 mm时C_1=5.00 kg/m^3/C_2=5.00 kg/m^{3}的工况这一特例，二次引燃的工况均被T_0点未超过250 ℃的工况包含在内。这一高度吻合的关系强有力地证实了250 ℃作为C2引燃临界温度的有效性，同时表明T_0点温度可作为预判树冠能否被引燃的关键指标。

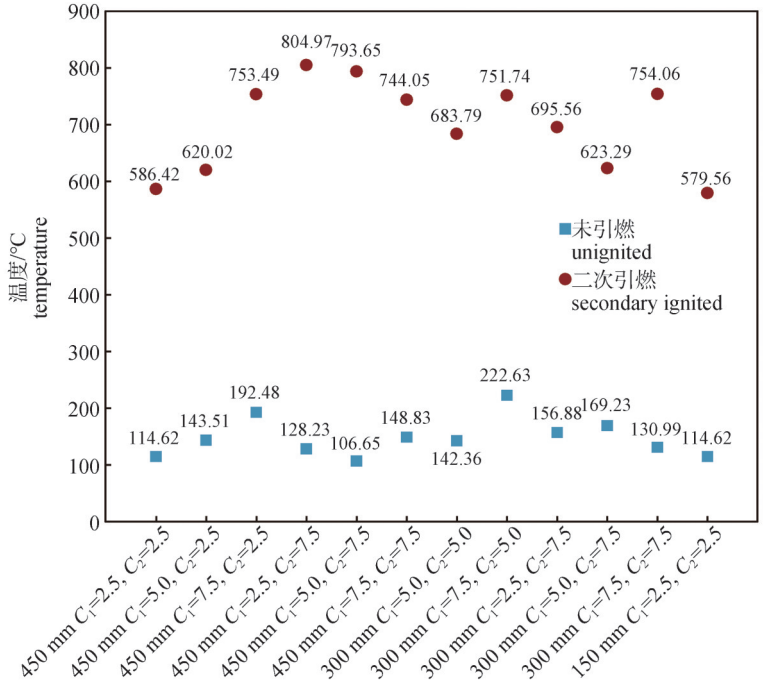


图6 二次引燃工况内部温度特征值

Fig. 6 Secondary ignited characteristic values of temperature inside

在实现从C1蔓延至C2的工况中，内部温度特征值最高温度为699.34 ℃，与进行二次引燃的工况内部温度特征值进行对比发现，有50%的工况超越了此极限，最高达105.63 ℃。虽然二次引燃的工况是由人工引燃而非自然蔓延的，但就C2本身的燃烧强度来说，二次引燃其C2冠层内部所能达到的温度水平，显著超过了自然蔓延工况的极限。

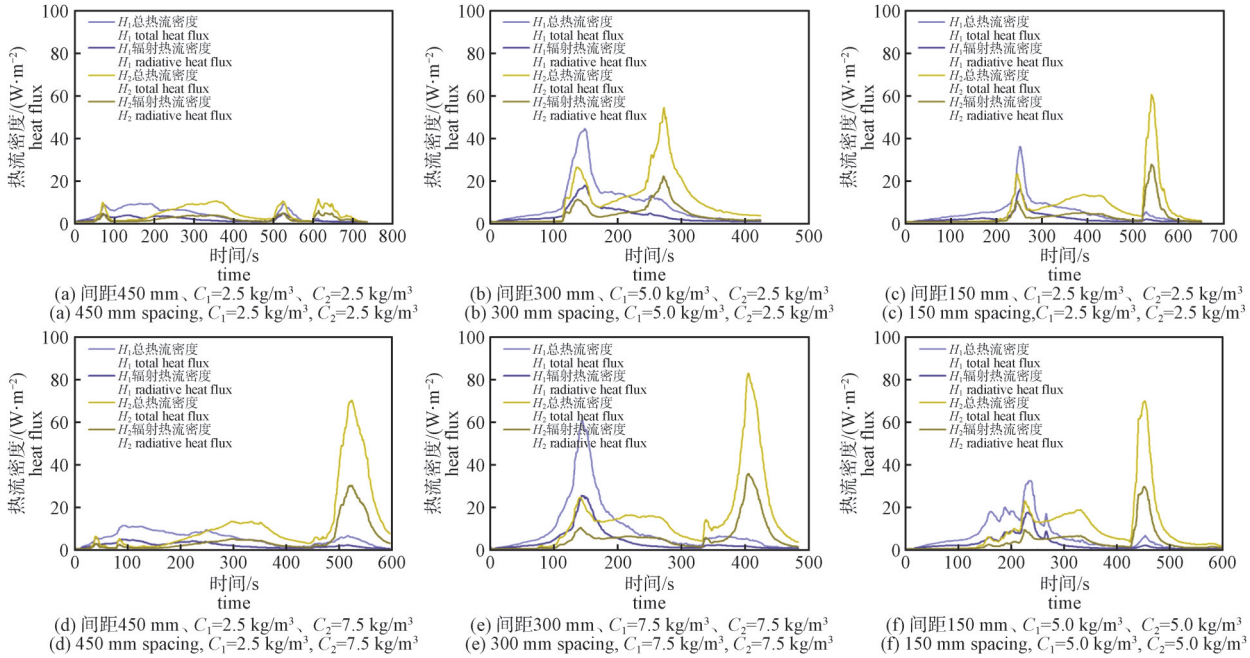
2.3 典型工况热流密度分析

图7展示了部分放置在C1和C2后方的热流计H_1和H_2测量的火焰前锋的总热流密度和辐射热流密度随时间变化情况。当火焰前锋距离热流计较远时，热流密度基本为零，而随着火焰逐渐向热流计靠近，热流密度显著上升，直至到达最大值，而后开始逐渐下降。以火焰前锋到达热流计时的总热流密度和辐射热流密度值定义为各工况下的热流密度特征值(H_{char})[32]，汇总结果见图8。

由图8可以观察到，在试验观测范围内，空白对照(CK)试验的总热流密度和辐射热流密度(CK-2.50 kg/m^3、CK-5.00 kg/m^3、CK-7.50 kg/m^3)随C2密度的增加而单调递增，且后续增量大于前期增量。

在所有试验工况下，尽管热流密度绝对值有所不同，但总热流密度与辐射热流密度的变化趋势表现出高度的一致性。两者曲线同步上升或下降，其峰值与谷值出现的位置也完全对应，这表明在静风、试验室小尺度条件下辐射传热是总传热中一个比例相对固定的、非常重要的组成部分，稳定在40%~46%。

间距为450 mm时，绝大部分试验工况的热流密度水平都远超对照试验。C1密度的效应强烈依赖于系统中C2密度的水平，当C_2=5.00 kg/m^{3}时，C1的作用最为显著。在此条件下，所有C1密度都带来了超过2倍的巨大提升，其中C_1=5.00 kg/m^{3}时达到峰值，热流密度提升至近3倍(2.99)。在C_2=2.50 kg/m^3(低密度)时，C1的作用不稳定且具有风险，只有C_2=5.00 kg/m^3(中密度)出现了显著提升，增幅达到对照组超过60%。在C_2=7.50 kg/m^3(高密度)时，C2燃烧状态较为稳定，C1的提升作用有限(1.2~1.3倍)，不如在C_2=5.00 kg/m^{3}时显著，其边际效益也呈现递减趋势。



(a) 间距450 mm、C_1=2.5 kg/m³、C_2=2.5 kg/m³ (a) 450 mm spacing, C_1=2.5 kg/m³, C_2=2.5 kg/m³

(b) 间距300 mm、C_1=5.0 kg/m³、C_2=2.5 kg/m³ (b) 300 mm spacing, C_1=5.0 kg/m³, C_2=2.5 kg/m³

(c) 间距150 mm、C_1=2.5 kg/m³、C_2=2.5 kg/m³ (c) 150 mm spacing,C_1=2.5 kg/m³, C_2=2.5 kg/m³

(d) 间距450 mm、C_1=2.5 kg/m³、C_2=7.5 kg/m³ (d) 450 mm spacing, C_1=2.5 kg/m³, C_2=7.5 kg/m³

(e) 间距300 mm、C_1=7.5 kg/m³、C_2=7.5 kg/m³ (e) 300 mm spacing, C_1=7.5 kg/m³, C_2=7.5 kg/m³

(f) 间距150 mm、C_1=5.0 kg/m³、C_2=5.0 kg/m³ (f) 150 mm spacing, C_1=5.0 kg/m³, C_2=5.0 kg/m³

图7　典型工况热流随时间变化图(部分)

Fig. 7　Heat flux measured curve in typical experiments (selected)

间距为300 mm时,当C_2=2.50 kg/m³时,C1的作用最为显著,其中C_1=5.00 kg/m³时最佳,热流密度提升至对照组的3.56倍。在C_2=5.00 kg/m³条件下,C1仍表现出良好的增强效果,其中C_1=2.50 kg/m³时提升幅度达2.96倍,而C_1=5.00 kg/m³的增效反而最弱。在C_2=7.50 kg/m³时,系统燃烧状态趋于稳定,C1的增效作用有限,所有密度均未带来显著提升,甚至出现一定抑制。

间距为150 mm时,在C_2=2.50 kg/m³与C_2=5.00 kg/m³条件下,中低密度的C1均带来显著的热流密度增强,提升幅度接近对照组的4倍(3.97、3.79)。其中在C_2=2.50 kg/m³、C_1=5.00 kg/m³的工况时,热流密度提升达到整个试验的峰值,增幅高达5.75倍,显示出C1在此条件下的最优强化效应。当C1密度超过最佳值(通常为5.00)时,所有C2水平下的热流密度均出现断崖式下跌。例如在C_2=5.00 kg/m³条件下,随着C1从2.50 kg/m³增至7.50 kg/m³,总热流密度从118.44 W/m²急剧下降至37.48 W/m²,反映出在近距离工况下,C1的增强效果高度依赖于其密度,且存在严格界定的有效范围,C1的增强作用存在明确的临界值,超过该值后增强效果将出现衰退。

综合以上结果表明,C1燃烧对C2燃烧产生的热流密度具有显著的强化作用,但其效果高度依赖于C2密度、系统工况及自身密度,存在明确的协同作用、C1与C2的最佳配比与过载临界点。

2.4　整体性分析

试验结果表明,树冠火从C1到C2的成功蔓延本质上是一个由能量传递主导、受冠层可燃物密度与间距共同调控的过程。在中大间距(450 mm和300 mm)下,C2自身密度是引燃能否成功的决定性因素,系统行为高度依赖于燃料本身。然而,随着间距减小至150 mm,传热的高低(T_0处升温)取代C2密度成为主控因素,导致引燃规律性减弱,呈现不确定性。

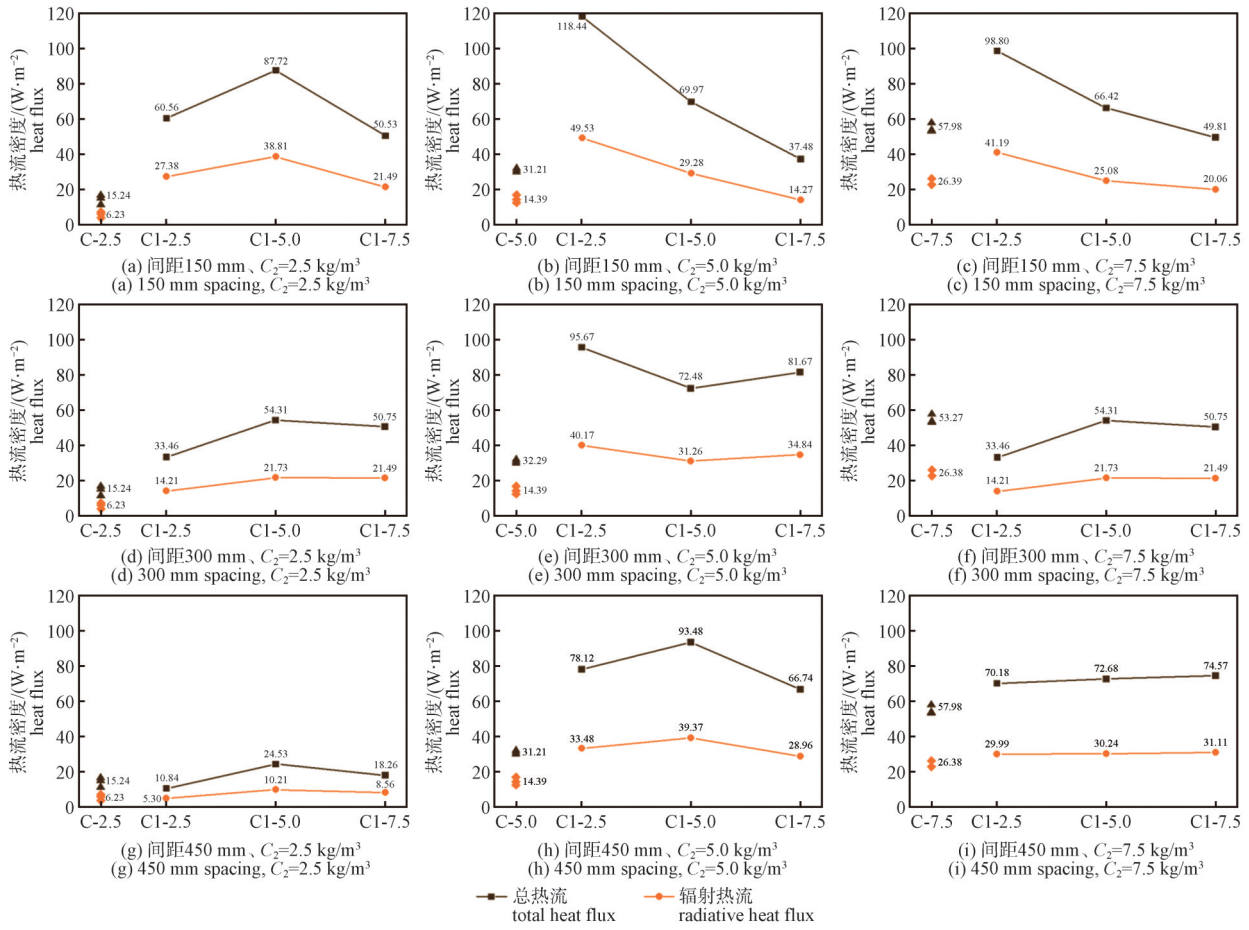
温度场的计算分析揭示,C2冠层温度变化范围由C2密度决定,其内部温度极差稳定于566~568 ℃,C1密度与间距在此范围内仅能在此极差限定的绝对温度区间内引起温度的局部增减。触发高温所需的最佳C2密度随间距减小呈现系统性变化,从间距为450 mm时的5 kg/m³,转变为间距为300 mm时的2.5 kg/m³,最终变为间距150 mm时的大于等于5 kg/m³。

通过分析未引燃与二次引燃工况,C2引燃的临界温度界定为250 ℃,且T_0点(C2前端下沿)温度可作为其有效预测指标。二次引燃工况中C2内部温度在50%的观测案例中(最高超出105.63 ℃)显著超越自然蔓延工况的极限(699.34 ℃)。

热流密度结果表明,在静风、试验室小尺度条件下辐射传热是能量传递的主导且稳定的机制(占比40%~46%)。C1对热流密度具有显著的非线性强化作用,其效果强烈依赖于C2密度与间距所构成的系统状态,存在明确的最佳配比(如间距为450 mm时,C_2=5.00 kg/m³,C_1=5.00 kg/m³)与过载临界点。

3　讨论

本研究通过系统的室内点烧试验和统计分析表



C-2. 5. 密度为 2. 5 kg/m³时的单冠层树冠火对照试验;C-5. 0. 密度为 5. 0 kg/m³时的单冠层树冠火对照试验;C-7. 5. 密度为 7. 5 kg/m³时的单冠层树冠火对照试验;C1-2. 5. C1 为 2. 5 kg/m³时的试验;C1-5. 0. C1 为 5. 0 kg/m³时的试验;C1-7. 5. C1 为 7. 5 kg/m3 时的试验。

C-2. 5. Control experiment on single-canopy crown fire at a bulk density of 2. 5 kg/m³; C-5. 0. Control experiment on single-canopy crown fire at a bulk density of 5. 0 kg/m³; C-7. 5. Control experiment on single-canopy crown fire at a bulk density of 7. 5 kg/m³; C1-2. 5. Experiment with C1 at 2. 5 kg/m³; C1-5. 0. Experiment with C1 at 5. 0 kg/m³; C1-7. 5. Experiment with C1 at 7. 5 kg/m³.

图 8 热流特征值变化图

Fig. 8 Variation of characteristic values of heat flux

明,C2 的引燃并非由单一因素控制,而是存在主导机制的转换,双冠层系统从由燃料控制向传热控制转变。系统整体温度的变化范围主要由 C2 密度决定,触发高温所需的最佳 C2 密度在间距 300 mm 处向低值移动,证明不存在普遍最优的 C2 密度。通过分析未引燃与二次引燃工况,C1 的介入不仅能实现引燃,更能驱动 C2 的燃烧性能发生跃迁,突破其自然蔓延的强度上限。在间距 450 mm 至间距 150 mm 的跨度内,火蔓延过程出现从燃料控制向传热控制的机制转换,这一转折现象表明,系统中可能存在一个划分不同行为模式的临界间距。

3. 1 冠层引燃临界温度的确定及意义

引燃临界温度的确定是评估林火风险的核心物理判据。在本研究中冠层引燃的临界温度在本研究中被确定为 250 ℃,这与多种针叶及阔叶可燃物在热重分析中主要组分发生剧烈热解的温度区间(通常为 200~300 ℃)高度吻合[33-34]。Reyes 等[35]基于传热理论构建冠层燃料点火模型,通过模拟辐射、对流换热对冠层燃料温度的影响,证实冠层燃料需达到 600 K(约 327 ℃)这一温度才会引燃,其物理本质与本研究的结论一致,均印证了树冠冠层的引燃存在明确的临界温度。引燃临界温度存在数值差异,大于本研究结果的本质是研究场景、技术方法与燃料特性均不同,但核心规律具有一致性,为森林火灾预警中冠层引燃风险的量化评估提供了理论支撑。

3. 2 无风条件下辐射传热的主导机制及强度调控

在无风条件下,辐射传热是冠层间能量传递的主导机制,这已得到多项研究的证实。在本研究中,双冠层树冠火的蔓延过程主要受能量传递主导,而水平间距与冠层密度的配置是调控该过程的关键,在能量传递形式上,明确了辐射传热是冠层间能量传递的绝对主导且稳定的机制。这与 Cobian-Iñiguez 等[36]在低速风洞中模拟查帕拉尔灌木林冠层火灾的无风试验所得

出的结论(辐射是冠层火蔓延主导机制)高度一致。本研究通过试验数据进一步量化了该主导作用,以红松为试验材料,测得辐射热流密度占总热流密度的比例稳定在40%~46%。这一辐射主导的机制,其强度并非固定,而是受到冠层自身结构特性的显著调节。Li等[37]在针对单株活体灌木的火行为试验中发现,在无风条件下,冠层的密度是决定其燃烧时内部热积累与辐射输出的关键参数。更高的密度不仅意味着单位体积内更多的可燃物,其紧密结构更有利于形成局部高温区,从而显著提升燃烧冠层作为辐射热源的强度。这表明,冠层火蔓延的情境中,冠层的密度是调控其辐射能量通量的核心因素,直接影响了火势跨越水平间隙的难易程度与蔓延速度。尽管本研究与上述两项研究在试验材料、具体构型及测量尺度上有所不同,但三者共同揭示了无风条件下辐射主导传热,且其强度受冠层密度正向调控这一共性规律。因此,在预测树冠火行为时,不能仅考虑辐射传热路径的存在,更需关注由密度差异所导致的辐射强度变化。

3.3　燃料空间异质性对温度场及模型简化的启示及局限

燃料的空间异质性深刻影响着燃烧过程中的能量分布。本研究观测到,随着冠层密度的增加,其内部形成的温度梯度也更为显著,在燃烧过程中,因其密度的不同在第二个冠层(C2)内部形成了明显差异化的温度梯度,这直观反映了可燃物密度对冠层内部能量分配的关键调控作用。这一宏观的冠层尺度温度梯度,其物理本质可能受到更微观的燃料颗粒内部热过程的深刻影响,McAllister等[38]通过小型风洞装置对活体针叶进行可控辐射加热的试验揭示,单片活体针叶在辐射加热下,其内部(从表面到髓心)会产生显著的温度梯度,这会影响水分蒸发与热解气体释放的耦合进程。本研究观测到的、由密度调控的冠层整体温度梯度特征,很可能正是由无数此类燃料颗粒的微观非均匀热响应在宏观上集成显现的结果,密度不仅通过改变燃料总量,更可能通过调制冠层内燃料颗粒的堆积密度与热相互作用,来影响宏观热传递效率与最终的燃烧行为。Guo等[39]通过开展试验室尺度下单株柏树冠火燃烧试验发现,火焰温度在树冠中部达到峰值,并沿高度方向呈非均匀分布,这一现象与本研究在多层燃料结构中观测到的密度依赖型温度梯度具有内在一致性,均表明燃料的空间分布对热量传递与局域能量积累具有决定性作用。当前许多林火蔓延模型在处理树冠火时,出于简化计算的需要,常将树冠乃至单树简化为具有均匀表面温度和恒定发射率的理想化几何体(如圆柱体或平面)[40-41],这种“均质化”建模策略降低了数值模拟的复杂度,却从根本上忽略了燃料空间异质性,不可避免地导致对冠层辐射热通量的系统性高估或误判,进而影响对火蔓延速率与强度的预测精度,尤其在对燃烧过程分辨率要求较高的情景(如飞火生成的临界条件判断)中,其局限性将更为突出。

3.4　研究局限性与展望

本研究结论存在一定的局限性。受试验条件所限(如静风环境、小尺度模型等),所获得的定量参数(如临界间距与温度阈值)更应被视为在特定试验条件下的发现,其普适性需在更接近真实林火的大尺度或野外试验中进一步验证。

综上所述,对冠层结构的过度简化,是现有模型在描述复杂火行为时出现系统性偏差的主要原因。这种简化割裂了宏观燃烧现象与介观燃料结构、微观颗粒过程之间的本质联系,因此未来能够准确预测树冠火行为的物理模型,应包含能够响应可燃物空间构型的部分,以建立从微观颗粒过程到宏观燃烧现象的更本质联系。

4　结论

此次研究通过对红松人工林地表及冠层可燃物进行不同间距、密度的双冠层树冠火水平蔓延的室内点烧试验,对比分析了冠层外缘、内部温度和冠层燃烧的热流密度的变化。结果表明,双冠层树冠火水平蔓延受能量传递主导,并由冠层密度与间距共同调控,火行为随间距减小由燃料控制向传热控制转变。系统温度场的变化主体范围由第二个冠层密度决定,第一个冠层密度与间距仅能在此范围内进行有限调整,且触发高温的最佳第二个冠层密度随间距变化,证明不存在普适最优密度。250 ℃是第二个冠层引燃的临界温度,第一个冠层燃烧的影响不仅能实现引燃,更能驱动第二个冠层燃烧强度突破自然蔓延的温度上限,实现大幅提升。另外,辐射传热是能量传递的主导机制,第一个冠层对第二个冠层燃烧时热流密度具有非线性强化作用,其效果存在明确的最佳配比与作用边界。

参　考　文　献

[1] 马诚,王劲,韩正宝,等. 滇东地区海寨林场针叶林地表可燃物潜在火行为研究[J]. 消防科学与技术,2024,43(2):265-270.
Ma Cheng, Wang Jin, Han Zhengbao, et al. Study on the potential fire behavior of surface fuels in coniferous forests in Haizhai forestry, east Yunnan region[J]. Fire Science and Technology, 2024, 43(2): 265-270.

[2] 胡同欣,宋浩然,李飞,等. 不同火烧强度对兴安落叶松

根系分解和土壤有机碳的影响[J]. 东北林业大学学报,2023,51(11):115-124.
Hu Tongxin, Song Haoran, Li Fei, et al. Effect of different burning intensities on decomposition of Larix gmelinii root system and its contribution to soil organic carbon[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(11): 115-124.

[3] 孙龙,包满意,胡同欣,等. 火烧强度对白桦枝叶生态化学计量特征的影响[J]. 东北林业大学学报,2022,50(3):64-69,76.
Sun Long, Bao Manyi, Hu Tongxin, et al. Effects of fire intensity on ecological stoichiometric characteristics of twigs and leaves of Betula platyphylla [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2022, 50(3): 64-69, 76.

[4] 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 Qiuhua. Study on fire behaviors in forest burning [D]. Beijing: China Academy of Forestry Sciences, 2010.

[5] 李乡状. 护林防火[M]. 天津:天津科学技术出版社,2011:135.
Li Xiangzhuang. Forest protection and fire prevention [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2011: 135.

[6] 李云路. 贵州森林火灾特征分析与对策研究[J]. 森林防火,2024,42(4):22-25.
Li Yunlu. Analysis of forest fire characteristics and countermeasures in Guizhou province [J]. Journal of Wildland Fire Science, 2024, 42(4): 22-25.

[7] 高敏,任云卯,周晓东,等. 抚育间伐对西山林场侧柏林冠层可燃物特征及潜在火行为的影响[J]. 北京林业大学学报,2022,44(8):56-65.
Gao Min, Ren Yunmao, Zhou Xiaodong, et al. Effects of thinning on canopy characteristics and potential crown fire behavior of platycladus orientalis in Xishan forest farm of Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(8): 56-65.

[8] Tachajapong W, Zhou X, Mahalingam S, et al. Experimental and numerical modeling of crown fire initiation [J]. Forest Ecology and Management, 2006, 234(S): S97.

[9] Cruz M G, Alexander M E, Wakimoto R H. Modeling the likelihood of crown fire occurrence in conifer forest stands [J]. Forest Science, 2004, 50(5): 640-658.

[10] Stocks B J, Alexander M E, Wotton B M, et al. Crown fire behaviour in a northern jack pine-black spruce forest [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(8): 1548-1560.

[11] Thomas A J, White D J, Murray B D. Tree species influence woodland canopy characteristics and crown fire potential [J]. Forest Ecology and Management, 2016, 362: 169-176.

[12] 张思玉,兰海涛. 针叶幼林树冠火发生的内在机制[J]. 东北林业大学学报,1998(5):77-80.
Zhang Siyu, Lan Haitao. The internal cause of occurencing crown fire in young coniferous forest [J]. Journal of Northeast Forestry University, 1998(5): 77-80.

[13] 吴清松,童盛,周建军,等. 树冠火蔓延模型和数值分析[J]. 火灾科学,1996(2):29-34.
Wu Qingsong, Tong Sheng, Zhou Jianjun, et al. A model of crown fire spreading and numerical analysis [J]. Fire Safety Science, 1996(2): 29-34.

[14] 张景群,王春雷,王得祥. 树冠火与林分层间易燃可燃物分布关系研究[J]. 森林防火,1995(4):5-9.
Zhang Jingqun, Wang Chunlei, Wang Dexiang. Study on the relationship between canopy fire and the distribution of flammable fuels between forest layers [J]. Journal of Wildland Fire Science, 1995(4): 5-9.

[15] 刘冠宏. 北京地区典型林分地表火及向树冠火蔓延机制研究[D]. 北京:北京林业大学,2019.
Liu Guanhong. Study on the mechanism of surface fire and spread of canopy fire of typical tree species in Beijing Area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.

[16] Ritter M S, Hoffman M C, Battaglia A M, et al. Vertical and horizontal crown fuel continuity influences group-scale ignition and fuel consumption[J]. Fire, 2023, 6(8): 321.

[17] 李笑笑,赵凤君,舒立福,等. 云南松鲜针叶中挥发油含量和组分及其在模拟林火预热条件下的溢出特点[J]. 林业科学,2024,60(12):111-119.
Li Xiaoxiao, Zhao Fengjun, Shu Lifu, et al. Content and composition of volatile oils in fresh needles of Pinus yunnanensis and their volatilization characteristics under simulated forest fire preheating conditions [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2024, 60(12): 111-119.

[18] 牟春杰. 单树树冠火发展及火行为特性研究[D]. 成都:西南交通大学,2021.
Mou Chunjie. Study on the development of crown fire and the characteristics of fire behavior [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

[19] 芦春凡. 关于推动黑龙江省红松产业高质量发展的对策建议[J]. 现代农业研究,2023,29(9):127-130.
Lu Chunfan. Suggestions on promoting the high-quality development of Korean pine industry in Heilongjiang Province[J]. Modern Agriculture Research, 2023, 29(9): 127-130.

[20] 耿道通. 红松人工林地表火行为模拟及蔓延速率预测模型研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2025.
Geng Daotong. Study of surface fire behavior simulation and rate of spread prediction model in *Pinus koraiensis* plantation[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2025.

[21] 任孟林,郭妍,陈伯轩,等. 红松人工林地表可燃物火蔓延速率预测模型[J]. 应用生态学报,2023,34(8):2091-2100.
Ren Menglin, Guo Yan, Chen Baixuan, et al. Prediction models of fire spread rate of Pinus koraiensis plantation's surface fuel [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(8): 2091-2100.

[22] 张吉利,刘礴霏,邸雪颖,等. 平地无风条件下蒙古栎

阔叶床层的火行为Ⅱ. 火焰长度和驻留时间影响因子分析与预测模型[J]. 应用生态学报,2012,23(11):3149-3156.
Zhang Jili, Liu Bofei, Di Xueying, et al. Fire behavior of mongolian oak leaves fuel bed under no-wind and zero-slope conditions. Ⅱ. analysis of the factors affecting flame length and residence time and related prediction models [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(11): 3149-3156.

[23] 金森,刘礴霏,邸雪颖,等. 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[J]. 应用生态学报,2012,23(1):51-59.
Jin Sen, Liu Bofei F, Di Xueying, et al. Fire behavior of mongolian oak leaves fuel-bed under no-wind and zero-slope conditions. Ⅰ. Factors affecting fire spread rate and modeling[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1):51-59.

[24] 张吉利,刘礴霏,邸雪颖,等. 平地无风条件下蒙古栎阔叶床层的火行为Ⅲ. 火线强度、可燃物消耗和燃烧效率分析及预测模型[J]. 应用生态学报,2013,24(12):3381-3390.
Zhang Jili, Liu Bofei, Di Xueying, et al. Fire behavior of quercus mongolica leaf litter fuelbed under zero-slope and no-wind conditions. Ⅲ. analysis and modelling of fireline intensity, fuel consumption, and combustion efficiency[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(12):3381-3390.

[25] 朱霁平,刘小平,林其钊,等. 变坡度情况下森林地表上坡火行为若干特征的实验研究[J]. 火灾科学(中英文),1999(2):65-73.
Zhu Jiping, Liu Xiaoping, Lin Qizhao, et al. Experimental study on upslope forest surfaceFire upon changing slope [J]. Fire Safety Science, 1999(2):65-73.

[26] Smith A M S, Partelli-Feltrin R, Sparks A M, et al. Methods to assess fire-induced tree mortality: review of fire behaviour proxy and real fire experiments [J]. International Journal of Wildland Fire, 2025, 34(1): WF24136.

[27] 许天一,甄贞,赵颖慧. 基于UAV-LiDAR和误差变量回归的落叶松人工林单木参数估测[J]. 中南林业科技大学学报,2023,43(7):52-64.
Xu Tianyi, Zhen Zhen, Zhao Yinghui. Estimation of individual tree parameters of larch plantations based on UAV-LiDAR and error in variable regression [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(7):52-64.

[28] 李丹丹. 森林火行为测量系统的研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2013.
Li Dandan. Study on the forest fire behavior measurement system[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.

[29] 邱玉成,丰绪霞. 帽儿山樟子松人工林林分轮伐期的确定[J]. 林业科技情报,2020,52(1):32-34.
Qiu Yucheng, Feng Xuxia. Determination of rotation felling period of camphor pine plantation in maoershan [J]. Forestry Science and Technology Information, 2020, 52(1):32-34.

[30] 郭妍. 森林地表火蔓延的实验模拟和预测模型研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2024.
Guo Yan. Experimental and theoretical study on forest surface fire spread [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2024.

[31] Fan J L, Chen B X, Guo Y, et al. Experimental study on the evolution of canyon fire spread behavior under different terrains and the critical conditions for eruptive fire [J]. International Journal of Wildland Fire, 2025, 34(10): WF24134.

[32] 孔林毅. 燃料床存在隔离带时的地表火蔓延研究[D]. 成都:西南交通大学,2023.
Kong Linyi. Experimental study on surface fire spread over fuel bed with firebreak[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2023.

[33] 郑泉兴,刘秀彩,吴添文,等. 不同植物纤维的热解和燃烧特性研究[J]. 燃料化学学报,2022,50(6):747-756.
Zheng Quanxing, Liu Xiucai, Wu Tianwen, et al. Study on pyrolysis and combustion characteristics of different plant fibers [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2022, 50(6): 747-756.

[34] 郑泉兴,李巧灵,张柯,等. 植物纤维的热裂解过程[J]. 应用化学,2022,39(7):1073-1082.
Zheng Quanxing, Li Qiaoling, Zhang Ke, et al. Pyrolysis process of plant fiber [J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2022, 39(7): 1073-1082.

[35] Reyes L, Abdelouahed L, Mohabeer C, et al. Energetic and exergetic study of the pyrolysis of lignocellulosic biomasses, cellulose, hemicellulose and lignin [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 244: 114458.

[36] Cobian-Iñiguez J, Aminfar A, Chong J, et al. Wind tunnel experiments to study chaparral crown fires [J]. Journal of Visualized Experiments, 2017(129): e56591.

[37] Li J, Mahalingam S, Weise D R. Experimental investigation of fire propagation in single live shrubs [J]. International Journal of Wildland Fire, 2017, 26(1): 58-70.

[38] McAllister S, Grenfell I, Hadlow A, et al. Piloted ignition of live forest fuels [J]. Fire Safety Journal, 2012, 51: 133-142.

[39] Guo H W, Gao Y J, Ye Z Q, et al. Experimental investigation of fire behaviours and heat transfer in single cypress tree crown fires [J]. International Journal of Wildland Fire, 2025, 34(2): WF24030.

[40] Meng Q K, Lu H, Huai Y J, et al. Forest fire spread simulation and fire extinguishing visualization research [J]. Forests, 2023, 14(7): 1371.

[41] Hajdu F, Hajdu C, Környei L, et al. Comparison of different geometry trees in fire simulation [J]. Pollack Periodica, 2024, 19(3): 34-39.