

不同火干扰强度对枫香次生林土壤理化性质的影响

刘发林, 陈小伟, 曾素平

(中南林业科技大学林学院, 长沙 410004)

摘要: 火干扰是影响森林土壤生态系统结构与功能的重要因素之一。探讨火干扰后森林土壤理化性质的动态特征, 为火后植被恢复以及森林可持续经营提供重要的理论指导。2014—2016 年在湖南省株洲市枫香次生林内设置 16 块 20 m×20 m 样地进行试验, 研究 4 种火干扰强度(对照、低强度、中强度、高强度火烧)后不同时间节点(火烧后 3, 30, 180, 360, 720 天)的枫香次生林的土壤容重(BD)、土壤斥水性(SWR)、有机质(SOM)、pH、全氮(TN)、全磷(TP)和全钾(TK)等指标。通过描述性统计、单因素方差分析和 Fisher LSD 检验研究了土壤性质在同一时间节点不同火干扰强度之间以及同一火干扰强度下不同时间节点间的显著性差异($p < 0.05$)。结果表明: 火干扰后各时间节点下, BD、SWR、pH、TK 均随火强度增大而增加, 而 SOM 和 TP 随火强度增大而降低, 不同火干扰间 TN 均不存在显著性差异。同一时间节点内火干扰土壤与对照相比, 低强度火干扰对 BD、SWR、pH 和 SOM 的影响不显著, 中强度火对部分时间节点下的土壤理化性质有影响, 而高强度火对其影响均比较显著。同一强度火干扰后, BD、SWR、pH 在不同时间节点间存在显著性差异, BD、SWR、pH 在火烧后 3 天显著增大, 然后逐渐减少; BD 在火后 360 天恢复到火烧前状态, 而 SWR、pH 则需 720 天。SOM 仅在高强度火烧后 360, 720 天与其他时间节点间存在显著性差异; 火干扰后, SOM 与火烧前相比先减少, 后逐渐上升, 火后 360 天逐渐恢复到火烧前的水平并维持稳定。中、高强度火干扰后, 时间节点跨度越大, TK 的差异越显著, 而 TN 和 TP 仅在高强度火烧后差异显著。研究发现火干扰强度和节点对 7 种土壤性质均有一定影响, 其中高强度火干扰对土壤理化性质影响最大。火干扰后短期内引起地力衰退, 影响林地土壤养分状况, 对土壤生态系统产生重要影响, 但随着时间推移, 2 年后土壤理化性质基本恢复到火烧前的水平。

关键词: 枫香; 次生林; 土壤性质; 火干扰强度

中图分类号: S714.3; S762.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0132-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.020

Effects of Fire Disturbance on Soil Physiochemical Properties in *Liquidambar formosana* Secondary Forest

LIU Falin, CHEN Xiaowei, ZENG Suping

(Faculty of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004)

Abstract: Fire disturbance is one of the important factors affecting the structure and function of forest soil ecosystem. In order to provide theoretical guidance for forest regeneration and sustainable management after fire disturbance, this study explored the dynamic characteristics of physiochemical properties in forest soil after different fire disturbances. The effects of fire intensities (control, low, moderate and high intensity fire) and time nodes (3, 30, 180, 360, 720 days after fire) on bulk density (BD), soil water repellency (SWR), soil organic matter (SOM), pH, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and total potassium (TK) contents were measured in a field-scale experiment with 16 plots (20 m × 20 m) from *Liquidambar formosana* secondary forests in Zhuzhou, Hunan Province, China from 2014 to 2016. The differences and changing trends of soil properties among different fire disturbances at the same time node and different time nodes under the same fire disturbance were studied by descriptive statistical analysis, one way ANOVA and Fisher LSD test ($p < 0.05$). The result showed that BD, SWR, pH, and TK increased with the increase of fire intensities, while SOM and TP decreased after the fire disturbance at the same time node. There was no significant difference of TN among different fire disturbances. Compared with the control, the effects of low intensity fire on BD, SWR, pH and SOM were not significant at the same time node, the effects of moderate intensity fire on these soil physiochemical properties were significant at some time nodes, while the effects of

收稿日期: 2019-03-27

资助项目: 国家自然科学基金项目(31470659)

第一作者: 刘发林(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事林火生态与森林资源经营管理研究。E-mail: liuf680@126.com

high intensity fire on them were significant. After the same intensity of fire disturbance, there were significant differences in *BD*, *SWR* and *pH* among different time nodes ($p < 0.05$). *BD*, *SWR* and *pH* increased significantly at the first three days after fire, then decreased gradually; *BD* returned to pre-fire level after 360 days of fire, while *SWR* and *pH* needed 720 days after fire. However, there were significant differences of *SOM* between 360, 720 days and other time nodes only after high intensity fire. After fire disturbance, *SOM* decreased first, then increased gradually, and returned to the level before fire and maintained stability after 360 days. After fire with moderate and high intensities, the greater the time span was, the more significant the difference of *TK* was, while the differences of *TN*, *TP* were only significant after high intensity fire. Fire intensities and time nodes had certain effects on the studied soil properties, among which high intensity fire showed the biggest effects on soil properties. Fire disturbance caused soil fertility decline in the short time and affected the soil nutrient status of forest land. However, with the time went on, the properties of soil physiochemical gradually recovered to the pre-fire level after two years.

Keywords: *Liquidambar formosana*; secondary forest; soil properties; fire intensity

森林土壤是林木生长发育的基础,也是森林生态系统健康经营的保障,土壤理化性质影响森林生态系统的可持续经营。林火是森林生态系统的干扰因子之一,影响森林生态系统的物种组成、结构和功能^[1]。林火对土壤理化性质产生很大影响,其影响程度与可燃物类型和载量、火强度、火持续时间、立地条件及火干扰后植被恢复状况密切相关^[2]。国内外对过火后土壤性质的影响研究^[3-4]很多,包括过火后土壤理化性质及养分循环、火干扰导致土壤温度上升、结构恶化、渗透性下降、有机质与养分减少及微生物群落功能多样性破坏。火干扰是影响土壤斥水性(*SWR*)的重要因素之一,已有研究^[5]发现,火干扰提高 *SWR*,导致地表径流和土壤侵蚀增加。已有研究^[6]发现,火烧和林分类型对土壤容重(*BD*)没有影响。北美针叶林采伐迹地可燃物载量大,高强度火后,土壤 *pH* 上升明显,*pH* 增加维持数年^[7];瑞士火烧迹地 *pH* 比对照样地高且持续 25 年^[8]。火干扰后土壤 *pH* 一般都会增加,由于燃烧使有机质释放出大量的碱金属及碱金属离子^[9]。土壤有机质的损失程度与火强度及持续时间有关。高温会降低土壤有机质(*SOM*)含量,对照林分间 *SOM* 差异不显著,但火烧后不同林分间 *SOM* 差异显著。火强度不同对土壤有机质的破坏程度也不同,低强度火干扰烧除了土壤表面部分有机质,高强度火干扰使土壤有机质减少 2~4 t/hm²^[10]。有研究^[3]表明,氮素的损失与火强度有关,低强度火干扰使氮素减少,高强度火干扰后土壤氮素损失达 72%~99%。低强度火干扰后,土壤中钾、磷大量降低。火干扰对土壤全氮(*TN*)、全钾(*TK*)含量的影响存在争议,有研究^[11]发现,火烧后全磷(*TP*)、*TK* 含量增大,但不同样地间 *TP* 无显著差异^[12],而 *TK* 在不同林分间差异显著^[13]。火烧后土壤 *TN* 含量随火强度增强而降低。谷会岩等^[14]研究发现,火干扰后 20 年土壤理化性质仍与对照样地存在差异,然而孙龙等^[15]采用时空替

代法研究了中强度火干扰后土壤性质变化规律,发现火干扰后 20 年土壤性质与对照样地间无显著差异。目前,关于火干扰对不同林分类型土壤性质影响的研究不够充分,研究的土壤理化性质不够全面。同时有关研究大多关注火干扰的短期效应,而对于长期影响报道较少,所取得的研究结果不尽一致,火干扰影响土壤性质的机理研究很少。

选取亚热带地区枫香(*Liquidambar formosana*)阔叶混交林为试验对象,在林分内设置 4 种火干扰强度处理,通过单次试验同时研究了不同火干扰强度下不同时间节点土壤理化性质动态,比较不同时间节点土壤理化性质对火干扰的敏感程度,目的在于探索:(1)火干扰强度对土壤理化性质的影响;(2)火干扰后土壤理化性质的动态变化规律,揭示火干扰对土壤理化性质的影响,为合理利用森林土壤资源、火烧迹地植被恢复及科学经营亚热带森林生态系统提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究样地位于丰陇(113°04'—113°43'E, 26°43'—27°06'N),隶属于湖南省株洲市攸县黄丰桥镇丰陇村。株洲属于亚热带季风气候,夏季温暖湿润,冬季寒冷干燥,气温为-11.9~40℃,年平均气温为 17.8℃,年平均降水量为 1 411 mm,全年有效积温为 5 180~5 320℃^[16]。试验林分的土壤特性见图 1 和表 1,表层土为红壤,土壤类型根据 FAO/UNESCO Taxonomy 进行分类^[17]。

选择株洲市丰陇为研究地主要是因为刀耕火种导致本区域内森林破坏严重,研究地森林面积约为 1.012 2×10⁸ m²,主要林分类型为枫香(*Liquidambar formosana*)次生林,主要伴生树种为:杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、木荷(*Schima superba*)、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)、红豆

杉(*Taxus chinensis*)、檫木(*Sassafras tzumu*)等。

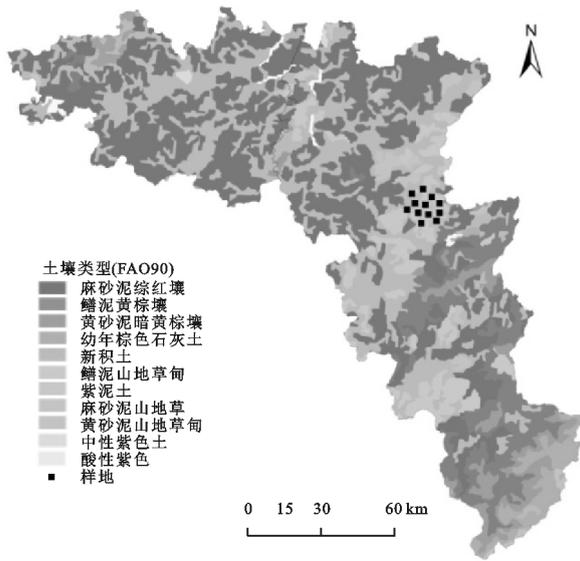


图 1 研究区土壤类型分布

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置和处理 2014 年 12 月在丰陇选择枫

表 2 火干扰试验特征

特征	对照	低强度火	中强度火	高强度火
火烧强度	无火干扰	低强度	中强度	高强度
火烧类型	/	地表火	地表火	地下火和树冠火
火焰高度/m	/	<1.5	1.5~3.0	>3
严重程度		树茎被烤焦, 树仍有绿色叶覆盖	树茎被烤焦, 树仍有绿色叶覆盖	树冠被烧毁无绿叶覆盖
燃烧等级	/	土壤有机质层保存完整, 炭化深度仅为几毫米	土壤有机质层保存完整, 炭化深度仅为几毫米	灰分沉积和烧焦的有机物达几厘米厚

1.2.2 土壤取样 土壤样本全部取自枫香次生林对照样地和 3 种火干扰样地(低、中和高强度)。沿每个样地对角线设置 3 个土壤剖面, 每个土壤剖面分 4 层进行取样: 0—5, 5—10, 10—15, 16—20 cm, 取样时采用 72 mm×50 mm 不锈钢环刀, 同时对样本进行标记, 并在实验室进行均质化。

每个对对照样地采集 4 个混合土壤样本, 即每层取 1 次样, 取样时间为 2014 年 12 月 23 日, 共计采集 16 个混合样本。火干扰样地进行取样时, 每个枫香次生林样地采集 60 个独立样本(4 层土壤, 5 个时间节点, 重复 3 次)。5 个时间节点分别为火后 3 天(2014 年 12 月 26 日)、1 个月(2015 年 1 月 24 日)、6 个月(2015 年 6 月 27 日)、12 个月(2015 年 12 月 24 日)、24 个月(2016 年 12 月 24 日)。1 个时间节点内每个样地采集 12 个独立土壤样本(3 个剖面), 火干扰后 3, 30, 180, 360, 720 天连续跟踪调查 5 次, 每次调查 144 个独立样本, 先后 5 次, 共采集 720 个土壤独立样本。

1.2.3 测定指标 (1)BD 和 SWR: 环刀法测定 BD (g/cm^3)。SWR(Log_{10} WDPT, s)通过滴水穿透时间法^[3]进行测定, 各采样点的土壤样品在室内干燥 24 h (温度 20 °C, 相对湿度 50%), 以排除大气湿度变化

香次生林, 林分密度约 1 300 株/ hm^2 , 平均年龄 17 年, 平均胸径 14.1 cm, 平均高 10.3 m。为了研究火强度对枫香次生林土壤理化性质的影响, 取样前在林分内设置 4 种火强度: 对照(无火干扰)、低、中、高强度火(表 2), 每种火强度各 4 块样地, 共设置 16 块样地, 样地形状与面积为 20 m×20 m。火干扰试验操作参照司绍兵^[18]的方法, 所有火处理在 2014 年 12 月 23 日完成。

表 1 试验地土壤性质

指标	表层土 0—60 cm	下层土 >60 cm
砾石含量/%	3.35~5.75	3.30~7.74
砂含量/%	41.85~54.1	41.79~45.56
泥沙量/%	20.71~29.12	19.11~26.88
黏粒含量/%	25.36~29.03	30.74~37.19
土壤容重/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.37~1.42	1.33~1.36
有机碳/%	0.94~4.53	0.43~1.26
pH(H_2O)	4.84~6.63	4.90~6.71

注: 数据由兰州冷旱区科学数据中心提供(<http://westdc.westgis.ac.cn>)。

对 SWR 的潜在影响^[19]。

(2)SOM 和 pH: 土壤样品在室内干燥 24 h, 粉碎后分成 2 份, 分别过 0.15 mm(用于 SOM)和 2 mm(用于 pH)筛备用。SOM(%)含量采用有机碳重铬酸盐快速氧化法测定^[20]。土壤 pH 通过玻璃电极法测定(水土比为 2.5:1)。

(3)TN、TP 和 TK: 土壤样品在 60 °C 下干燥 24 h, 分成 2 份, 分别过 0.25 mm(用于 TN)和 0.15 mm(用于 TP、TK)筛备用。土壤 TN(%)用凯氏定氮法^[20]测定, 土壤 TP(g/kg)通过浓硫酸—高氯酸法^[20]测定, TK(g/kg)采用碱熔法^[20]测定, 之后用火焰光度计进行测定。

1.2.4 统计分析 利用 SPSS 11.5 软件对枫香次生林火干扰强度后不同时间节点 0—20 cm 的 7 种土壤理化性质(BD、SWR、pH、SOM、TN、TP 和 TK)进行统计分析, 分析方法包括描述性统计、单因素方差分析和 Fisher LSD 显著性检验($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 BD 和 SWR

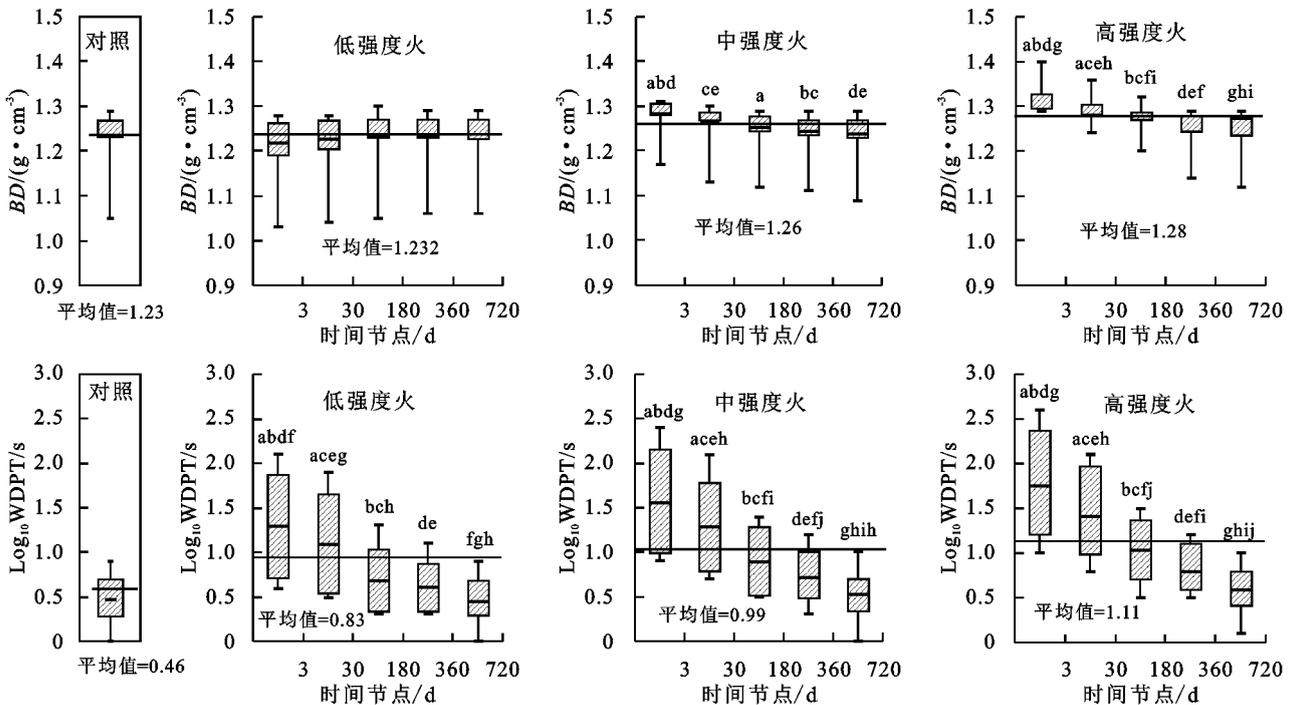
不同火干扰强度(对照、低、中、高)下各时间节点土壤 BD、SWR 均表现出不同程度的差异(图 2)。同

一时间节点的 BD 和 SWR 随火强度增大而增加,且高强度火烧对其作用最显著。 SWR 在不同火干扰下增大趋势较 BD 更为明显。

各时间节点 BD 都随火强度的增大而增大。低强度火干扰后,各时间节点之间的 BD 均不存在显著性差异;中强度火干扰后, BD 在 3,30 天后分别与 360,720 天间都存在显著差异,同时 BD 在 3 天与 30 天之间也存在显著性差异;高强度火干扰后, BD 在 180 天内各时间节点间存在显著差异($p < 0.05$)。火干扰 1 年后,不同火干扰间 BD 均无显著差异。有研究^[21-22]显示火烧后 BD 变小,但火烧前后没有显著差异,这与本研究结论存在差异。Xue 等^[21]研究发现,火烧后土壤 BD 降低,但火烧与对照样地间 BD 无显著差异。辛颖等^[22]研究发现,与对照样地相比,火烧前后 BD 无显著差异。

除火干扰后 3 天外,其他各时间节点 SWR 随火强度的增大而增大。除火干扰后 720 天外,不同火干扰各时间节点间 SWR 差异显著。低强度火烧后, SWR 仅在 180 天与 360 天间不存在显著差异,其他时间节点相互之间均存在显著性差异;中、高强度

火干扰后,不同时间节点间 SWR 存在显著差异($p < 0.05$)。除 720 天外,各时间节点的中、高强度火烧后与火烧前 SWR 差异显著($p < 0.05$)。已有研究^[19,23-27]发现,不同强度火烧后 SWR 有增加、减少或者没有影响,这些都是因为其受火强度、火持续时间、立地类型,特别是土层深度的影响。Doerr 等^[19]研究发现,低强度火对葡萄牙桉树和松树林中的 SWR 没有影响。Letey^[23]研究发现, SWR 随火强度的增大而增大,这一影响在高强度火干扰下更加明显,MacDonald 等^[24]研究发现, SWR 随火强度的增大而显著增大,与本研究结果一致。火烧会导致斥水性物质的强化和易位,低强度火烧区 SWR 高于对照,但无显著差异,但中、高强度的火烧显著增加 SWR ^[25],而 Glenn 等^[26]研究发现,土壤的入渗速率在中强度火烧后显著大于高强度火烧,进一步确定中强度火烧后 SWR 比其他强度火烧后都大,这是因为研究样地主要是灌木林和草地。有研究^[27]发现,对照样地 SWR 比其他 3 种火烧后的都大, SWR 在 4 个区域的表土间都没有显著差异,发现人工林中林火引起表层土壤斥水性物质被烧毁,而下层 SWR 则增强。



注:图中不同小写字母表示在火干扰处理后不同时间节点显著差异(单因素方差分析,Fisher LSD 检验, $p < 0.05$)。下同。

图 2 火干扰后林分 0—5 cm 土层 BD 和 SWR

2.2 SOM 和 pH

pH 在各个时间节点下都随火强度的增大而增大(图 3),但随火干扰后时间的推移,不同火强度下 pH 均表现为逐渐减少。低强度火干扰后 3 天,30 天时 pH 分别显著大于其他 3 个时间节点($p < 0.05$),而 180 天后各时间节点间均不存在显著性差异。中、高强度火干扰后 360 天和 720 天之间 pH 没有显著差异($p < 0.05$)。3 天后不同火强度间 pH 均存在显著性差异;30 天和 180 天

后低强度与对照之间无显著差异;360 天后则低、中强度火干扰与对照之间没有显著差异;720 天后不同火强度间均无显著差异。目前大部分研究^[28]发现林火使土壤 pH 增大,但也有研究^[29]发现,火烧对 pH 影响不大。Hesammi 等^[28]研究发现,燃烧作物残茬后土壤 pH 升高,归因于土壤有机酸被分解,金属离子含量增加。赵彬等^[30]研究发现,低强度火烧对土壤 pH 无影响,中、高强度火烧区 pH 高于对照,可能是因为较高强度的火烧

使土壤和凋落物中大量未离解的有机酸分解,逐渐从系统中消失,与本研究结论大概一致。然而辛颖等^[22]发现,高强度火干扰后,樟子松林土壤 pH 升高,其他林分土壤 pH 均降低,与本研究结果存在差异,估计与 2 个研究林分及土壤类型有关。

同一时间节点内 SOM 随火强度的增大而减少,5 个时间节点表现一致。随火烧后时间的推移,不同火强度下 SOM 均表现为逐渐增大。低强度火干扰 720 天后 SOM 与 3,30 天之间存在显著差异;中强度火干扰 720 天后 SOM 与 3,30,180 天之间存在显著

差异;高强度火干扰 3,30,180 天之间均无显著差异,而 360,720 天与其他时间节点间均存在显著差异。有研究^[3]认为,火烧减少 SOM 含量,也有研究^[31]认为,SOM 随火强度增大而增大。本研究发现,各时间节点 SOM 含量都随火强度的增大而减少。高强度火烧后大部分土壤 SOM 显著小于其他火干扰,低、中强度火烧间 SOM 差异不显著(除 360,720 天),表明 SOM 受高强度火的影响较显著。低强度火烧通常不会导致土壤有机碳发生较大的变化,但高强度火可导致土壤碳大量损失,与本研究结论一致。

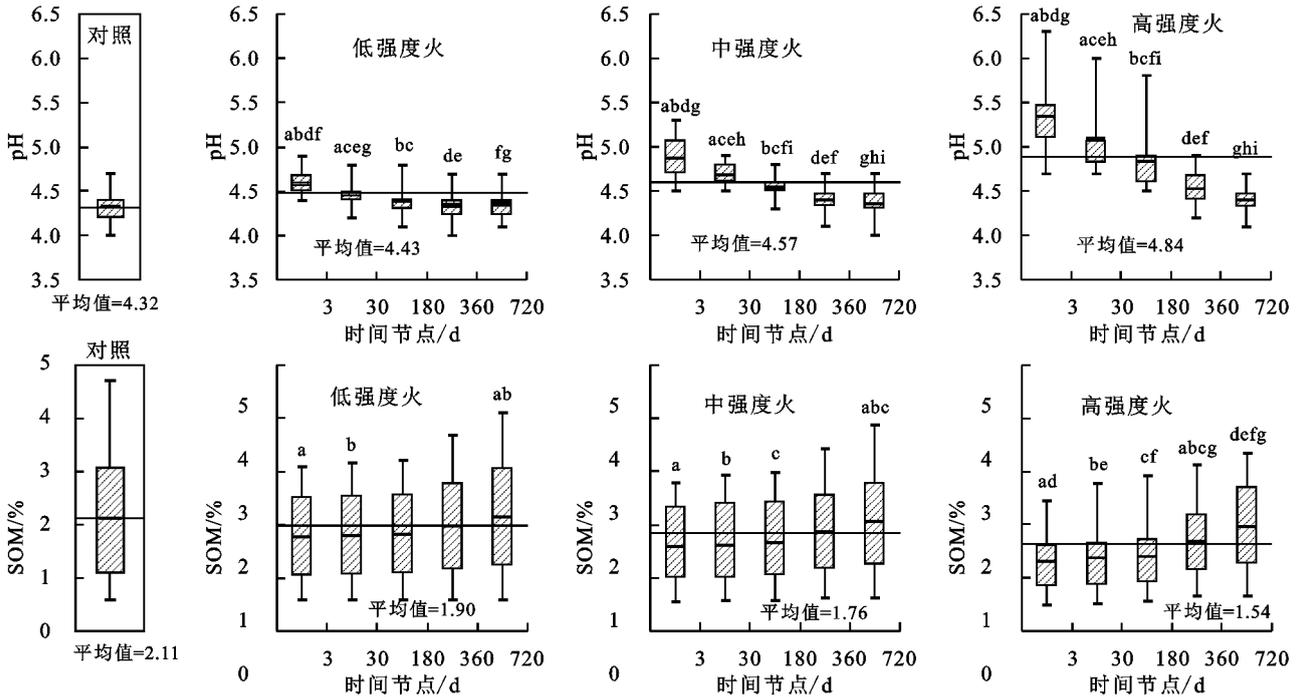


图 3 火干扰后林分土壤 0—5 cm 土层 SOM 和 pH

2.3 TN、TP 和 TK

土壤 TN 在同一时间节点下不同火干扰(对照、低、中、高)间变化不大,TP 随火干扰强度增大呈下降的趋势,而 TK 随火强度增加呈上升的趋势(图 4)。

低、中强度火干扰后,不同时间节点间 TN 均不存在显著性差异。高强度火干扰后,TN 在 30 天与 3,180 天间,360 天与 180,720 天间不存在显著性差异。同一时间节点不同火强度间,TN 仅 3 天后低强度和高强度火干扰间具有显著性差异($p < 0.05$)。有研究^[32]认为,火干扰对土壤 TN 无显著影响,与本研究结论相似。然而也有研究^[33-34]发现 TN 在火烧后增加或减少。Wieting 等^[33]、刘瑞斌等^[34]研究发现,火烧后 TN 随火烧强度增大逐渐增大,高强度火烧区 TN 含量显著高于其他火烧区,即高强度 > 中强度 > 低强度,可能由于土壤微生物量的增长导致土壤有机质含量增加和矿化作用加强,从而刺激了 TN 增加,然后逐渐减少^[30]。也有研究^[35]发现,火烧 2 年后 TN 含量显著下降,火干扰导致松树林土壤 TN 减少,表面 2 cm 厚灰烬中 TN 含量较对照森林土壤减少 25%,与本研究结论存在差异。

同一时间节点内、不同火干扰间 TP 均不存在显著差异,这一结果在 5 个时间节点一致;与对照相比,低强度火烧后 TP 先增大,后减小。低、中强度火干扰后,不同时间节点间 TP 均无显著性差异。高强度火烧 3 天后与 360,720 天间 TP 存在显著性差异。有研究^[20]发现,火灾导致 TP 降低,原因是火烧使 TP 从植物体和凋落物中释放出来,与本研究结果一致,然而,马尾松林 TP 在火灾发生 4 年后显著降低,并维持不变;也有研究^[36]发现,炼山后桉树林表层土壤 TP 含量在 1 周后增大,但 4 个月后低于对照区,与本研究结论存在一定差异,是因为研究的时间节点和林分不同。

同一时间节点内,火后 3 天和 30 天,TK 随火干扰强度增大而稍升高,5 个时间节点不同火干扰之间均不存在显著性差异($p < 0.05$)。同一火干扰强度下,不同时间节点 TK 都表现为 3 天 > 30 天 > 180 天 > 360 天 > 720 天。中强度火烧后,TK 在天、30 天显著大于 360,720 天;高强度火烧后,TK 在 3,30 天均显著大于其他 3 个时间节点。有研究^[7]发现,火烧后 TK 升高。Doerr 等^[19]研究表明,火灾后 1 个月,

有效钾含量明显高于对照,3 个月后持续增加,土壤温度和灰分增加了可萃取钾的含量。Xue 等^[21]研究

表明,火烧后土壤 TK 含量略有增加,而火烧后 1~7 年土壤 TK 含量逐渐减少,与本研究结果部分一致。

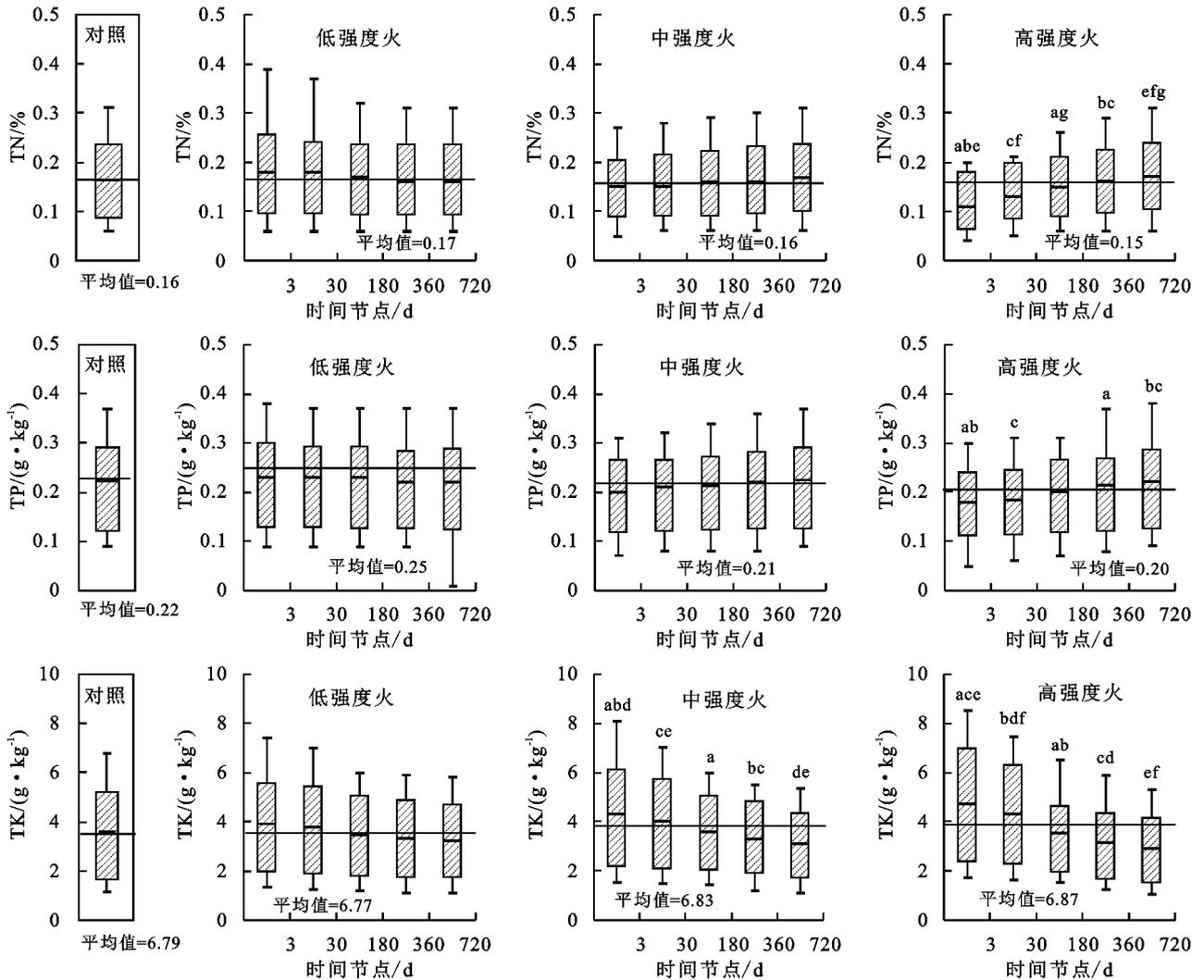


图 4 火干扰后林分土壤 0—5 cm 土层 TN、TP 和 TK

3 结论

火干扰强度和时间节点对 7 种土壤性质均有一定影响,其中高强度火干扰对土壤性质影响最大。BD、SWR、pH 和 TK 随火烧强度增加而增加,而 SOM、TN、TP 随火强度增大而减少。

BD 随火强度的增大而增大,高强度火对 BD 的影响显著,中强度火相对较小,而低强度火对其无显著影响。SWR 受中、高强度火的影响显著,而低强度火对其影响较小。火干扰后 SOM 先减少,后逐渐变大。中、高强度火对 pH 影响显著。TN 受火烧强度的影响较小,火强度越大 TK 含量越高。

高强度火烧后 BD 受时间节点的影响显著,360 天后 BD 恢复到火干扰前水平。SWR 受时间节点的影响显著,不同时间节点间均存在显著性差异(除低强度火烧后,360 天与 180、720 天间不存在显著性差异)。360 天前 SOM 受高强度火的影响显著,到 360 天时逐渐恢复到火烧前的水平并维持稳定。火干扰可导致土壤 pH 升高,火烧后 3 天显著增大,后逐渐减少,720 天后 pH

逐渐恢复到火烧前的水平。低、中强度火烧后,TN 受时间节点的影响较小,高强度火烧后,受时间节点的影响较大。各时间节点火强度对土壤 TP 无显著影响。低强度火后,TK 含量不受时间节点影响,中、高强度火干扰后,TK 受时间节点的影响显著。

参考文献:

- [1] Johnstone J F, Hollingsworth T N, Chapin F S, et al. Changes in fire regime break the legacy lock on successional trajectories in Alaskan boreal forest[J]. *Global Change Biology*,2010,16(4):1281-1295.
- [2] 胡海清,刘洋,孙龙,等.火烧对不同林型下森林土壤水分子物理性质的影响[J].*水土保持学报*,2008,22(2):162-165.
- [3] Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: A review [J]. *Oecologia*,2005,143(1):1-10.
- [4] Banning N C, Murphy D V. Effect of heat-induced disturbance on microbial biomass and activity in forest soil and the relationship between disturbance effects and microbial community structure [J]. *Applied Soil Ecology*, 2008,40(1):109-119.

- [5] Marafa L M, Chau K C. Effect of hill fire on upland soil in Hong Kong [J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, 120(1/3): 97-104.
- [6] Kutiel P, Naveh Z. The effect of fire on nutrients in a pine forest soil [J]. *Plant and Soil*, 1987, 104(2): 269-274.
- [7] Kim Y, Tanaka N. Effect of forest fire on the fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O in boreal forest soils, interior Alaska [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(1): 1-12.
- [8] Blair J M. Fire, N availability, and plant response in grasslands: A test of the transient maxima hypothesis [J]. *Ecology*, 1997, 78(8): 2359-2368.
- [9] Hatten J A, Zabowski D, Ogden A, et al. Soil organic matter in a ponderosa pine forest with varying seasons and intervals of prescribed burn [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2555-2565.
- [10] Kim Y S, Makato K, Takakai F, et al. Greenhouse gas emissions after a prescribed fire in white birch dwarf bamboo stands in northern Japan, focusing on the role of charcoal [J]. *European Journal of Forest Research*, 2011, 130(6): 1031-1044.
- [11] 张喜, 朱军, 崔迎春, 等. 火烧对黔中喀斯特山地马尾松林土壤理化性质的影响 [J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5809-5817.
- [12] Baer S G, Kitchen D J, Blair J M, et al. Changes in ecosystem structure and function along a chronosequence of restored grasslands [J]. *Ecological Applications*, 2002, 12(6): 1688-1701.
- [13] 肖灵香, 方晰, 项文化, 等. 湘中丘陵区 4 种森林类型土壤理化性质 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(5): 90-97.
- [14] 谷会岩, 金靖博, 陈祥伟, 等. 不同火烧强度林火对大兴安岭北坡兴安落叶松林土壤化学性质的长期影响 [J]. *自然资源学报*, 2010, 25(7): 1114-1121.
- [15] 孙龙, 赵俊, 胡海清. 中度火干扰对白桦落叶松混交林土壤理化性质的影响 [J]. *林业科学*, 2011, 47(2): 103-110.
- [16] 许舟, 刘发林. 马尾松林植物及土壤养分对频繁火干扰的响应 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(6): 46-50.
- [17] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, et al. Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008) [M]. IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy, 2008.
- [18] 司绍兵. 浅谈采伐迹地的炼山方法 [J]. *安徽林业科技*, 2009(3): 46-46.
- [19] Doerr S H, Dekker L W, Ritsema C J, et al. Water repellency of soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(2): 401-405.
- [20] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [21] Xue L, Li Q J, Chen H Y. Effects of a wildfire on selected physical, chemical and biochemical soil properties in a *Pinus massoniana* forest in South China [J]. *Forests*, 2014, 5(12): 2947-2966.
- [22] 辛颖, 赵雨森, 陈强. 大兴安岭火烧迹地植被恢复后土壤理化性质 [J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(8): 65-68.
- [23] Letey J. Causes and consequences of fire-induced soil water repellency [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(15): 2867-2875.
- [24] Mac Donald L H, Huffman E L. Post-fire soil water repellency [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(5): 1729-1734.
- [25] Gordillo-Rivero A J, Garcia-Moreno J, Jordan A, et al. Fire severity and surface rock fragments cause patchy distribution of soil water repellency and infiltration rates after burning [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(24): 5832-5843.
- [26] Glenn N, Finley C D. Fire and vegetation type effects on soil hydrophobicity and infiltration in the sagebrush-steppe: I. Field analysis [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(6): 653-659.
- [27] Robichaud P R, Hungerford R D. Water repellency by laboratory burning of four northern Rocky Mountain forest soils [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 231/232: 207-219.
- [28] Hesammi E, Talebi A B, Hesammi A. A review on the burning of crop residue on the soil properties [J]. *Walia Journal*, 2014, 30(1): 192-194.
- [29] Zhao Y, Wang Y Z, Xu Z H, et al. Impacts of prescribed burning on soil greenhouse gas fluxes in a suburban native forest of south-eastern Queensland, Australia [J]. *Biogeosciences*, 2015, 12(21): 6279-6290.
- [30] 赵彬, 孙龙, 胡海清, 等. 兴安落叶松林火后对土壤养分和土壤微生物生物量的影响 [J]. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 450-459.
- [31] Trabaud L. The effects of different fire regimes on soil nutrient levels in *Quercus coccifera* garrigue. In *Mediterranean-Type Ecosystems* [M]. Berlin: Springer, 1983: 233-243.
- [32] Scharenbroch B C, Nix B, Jacobs K A, et al. Two decades of low-severity prescribed fire increases soil nutrient availability in a Midwestern, USA oak (*Quercus*) forest [J]. *Geoderma*, 2012, 183/184(8): 80-91.
- [33] Wieting C, Ebel B A, Singha K. Quantifying the effects of wildfire on changes in soil properties by surface burning of soils from the Boulder Creek Critical Zone Observatory [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017, 13(C): 43-57.
- [34] 刘瑞斌, 李莉, 陈鹏东, 等. 森林火灾对烟台莱山次生林土壤性质的影响 [J]. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1300-1305.
- [35] Bell R L, Binkley D. Soil nitrogen mineralization and immobilization in response to periodic prescribed fire in a loblolly pine plantation [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, 19(6): 816-820.
- [36] 杨尚东, 吴俊, 谭宏伟, 等. 红壤区桉树人工林炼山后土壤肥力变化及其生态评价 [J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7788-7797.