

DOI: 10.5846/stxb201812052665

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.

Zeng S P, Liu F L, Zhao M F, Wang G J, Chen X W. Effects of fire disturbance intensities on soil physiochemical properties of four subtropical forest types. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 233-246.

火干扰强度对亚热带四种森林类型土壤理化性质的影响

曾素平¹, 刘发林¹, 赵梅芳^{2,3,4,*}, 王光军^{2,3,4}, 陈小伟¹

1 中南林业科技大学林学院, 长沙 410004

2 中南林业科技大学生命科学与技术学院, 长沙 410004

3 湖南会同杉木林生态系统国家野外科学观测研究站, 会同 418300

4 南方林业生态应用技术国家工程实验室, 长沙 410004

摘要: 火干扰是通过改变土壤理化性质而影响土壤生态系统功能的重要因素之一。探讨火干扰强度对不同森林类型下土壤理化性质的影响, 为利用火干扰促进林分更新及经营提供理论指导。2014 年在湖南省株洲市和湘潭市 4 种次生林(枫香次生林、马尾松-木荷混交林、杉木-木荷混交林及樟木-杉木混交林) 内设置 16 块 20 m×20 m 样地进行试验, 研究了火干扰强度(对照、低强度、中强度、高强度火烧) 和林分类型对土壤容重(BD)、土壤斥水性(SWR)、有机质(SOM)、pH、全氮(TN)、全磷(TP) 和全钾(TK) 的影响。通过描述性统计分析、单因素方差分析和 Fisher LSD 检验研究各土壤性质在同一林分不同火干扰间, 以及同一火干扰下不同林分间的显著性差异和变化趋势($P<0.05$)。研究发现 BD、SWR、pH、TK 都随火强度的增大呈上升的趋势, 而 SOM、TP 随火强度增大而减少, TN 则随火强度增大没有规律性变化。在同一林分内与对照组相比, 低强度火烧对 BD、SWR、pH 和 SOM 的影响不显著, 中强度有一定影响, 而高强度火烧影响显著; 而 TN、TP、TK 在火烧前后均无显著性差异。火干扰后, TN 和 TP 在同一火强度下不同林分间均存在显著性差异($P<0.05$), 而 BD、pH 值和 TP 在同一林分内不同火强度间均存在显著性差异($P<0.05$)。BD、SOM、pH、TK 在枫香次生林内普遍显著大于其他林分。结果说明火干扰强度和林分类型在影响土壤理化性质方面起着重要作用。高强度火干扰对土壤性质影响最大, 枫香次生林中土壤理化性质与其他混交林相比普遍存在显著性差异。BD、pH 和 TP 受火强度影响显著, BD、SOM、pH、TN、TK 和 TP 受林分类型影响显著。

关键词: 土壤性质; 火干扰强度; 森林类型

Effects of fire disturbance intensities on soil physiochemical properties of four subtropical forest types

ZENG Suping¹, LIU Falin¹, ZHAO Meifang^{2,3,4,*}, WANG Guangjun^{2,3,4}, CHEN Xiaowei¹

1 Faculty of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

2 Faculty of Life Science and Technology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China

3 Huitong National Field Station for Scientific Observation and Research of Chinese Fir Plantation Ecosystem in Hunan Province, Huitong 418300, China

4 National Engineering Laboratory for Applied Forest Ecological Technology in Southern China, Changsha 410004, China

Abstract: Fire disturbance is one of the most important factors that influences the ecosystem function of soil by changing its physical and chemical properties. To provide theoretical guidance for forest regeneration and management using fire disturbance, this study explored the influence of fire intensity on soil physical and chemical properties in different forest types. The effects of fire intensity (control, low, moderate, and high-intensity fire) and forest types on bulk density (BD),

基金项目: 国家自然科学基金项目(31470659); 林业公共产业科学研究项目(201504301)

收稿日期: 2018-12-05; 网络出版日期: 2019-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaomf963@126.com

soil water repellency (SWR), soil organic matter (SOM), pH, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and total potassium (TK) were determined in a field-scale experiment on 16 plots (20 m × 20 m) in four secondary forests (*Liquidambar formosana*, *Pinus massoniana*-*Schima superba*, *Cunninghamia lanceolata*-*Schima superba*, and *Sassafras tzumu*-*Cunninghamia lanceolata*) in Zhuzhou and Xiangtan, Hunan Province, southern China, in 2014. The differences and trends in change of soil properties among the different fire-disturbance levels in the same forest and among forest types under the same fire-disturbance level were analyzed using descriptive statistical analyses, one-way ANOVA, and Fisher LSD test ($P < 0.05$). BD, SWR, pH, and TK increased with increase in fire intensity, whereas SOM and TP decreased and TN was not altered with increasing fire intensity. Compared with the control group in the same stand, the effects of low-intensity fire on BD, SWR, pH, and SOM were not significant; however, moderate-intensity fire had some effects, and the effects of high-intensity fire were significant. Nevertheless, no significant differences were observed among TN, TP, and TK pre- and post-fire. There were significant differences in TN and TP between the different forest types after the same fire disturbance, whereas there were significant differences in BD, pH, and TP among fire intensities in the same forest type ($P < 0.05$). BD, SOM, pH, and TK in secondary forests of *L. formosana* were significantly higher than those in the other forest types. The results indicated that fire disturbances and forest types played significant roles in altering soil physical and chemical properties. High-intensity fire had the greatest effects on soil properties. There were significant differences in soil properties between *L. formosana* and the other three mixed forests. BD, pH, and TP were significantly affected by fire intensity. BD, SOM, pH, TN, TK, and TP were significantly affected by forest types.

Key Words: soil properties; fire intensity; forest types

林火是指在林地上自由蔓延的火,通常是破坏生态系统又是森林更新的主要影响因子,其通过燃烧大量的森林植被和凋落物改变土壤的理化性质而影响土壤的生态功能和生物地球化学循环^[1-2],而森林土壤理化性质的改变反过来又会直接影响地上植物的生长^[3]。林火不仅导致土壤温度显著升高和土壤斥水性增强^[4-5],而且影响有机质的矿化和分解过程,进而影响土壤内的养分循环^[6]。大多数研究发现不同强度的林火对土壤理化性质的影响有差异,其中高强度火的影响最大^[3,7],而林分类型对其是否有影响的研究比较少见^[8]。目前已有的研究对象主要集中在北方地区针叶或者阔叶纯林内^[9],而林火对亚热带地区常见林分类型内土壤性质的影响亟待研究。因此,研究火干扰强度对不同林分类型下土壤环境的影响,有助于揭示火后不同植被受影响的差异。

火干扰对林分内土壤理化性质影响的研究较多,不同火强度和林分类型对土壤性质的影响具有差异性。研究发现土壤容重(bulk density, BD)不受火强度影响^[10],如孔健健和杨健^[3]发现兴安落叶松林在低强度和高强度火干扰间无显著差异。火干扰是影响土壤斥水性(soil water repellency, SWR)的重要因素之一,它可以提高林分内 SWR,降低渗透率,增加地表径流和土壤侵蚀;也有研究发现土层深度和植被类型对 SWR 也有很大影响^[4,11]。研究认为火烧后土壤 pH 的变化取决于火干扰强度,但也受时间节点的影响^[12-13];大部分研究发现 pH 在相同林分下受火干扰影响不大,而辛颖等发现高强度火烧后表现为樟子松林显著大于山杨林(*Pobulus davidiana*)、兴安落叶松林(*Larix gmelini*)和白桦林(*Betula platyphylla*)^[14]。高温会降低土壤有机质(soil organic matter, SOM)含量^[1,15-16],未火烧时不同林分间 SOM 差异不显著,但火烧后不同林分间 SOM 差异显著。火干扰对土壤全氮(total nitrogen, TN)、全钾(total potassium, TK)含量的影响存在争议,有研究认为林火强度对土壤养分有效性有一定的影响,土壤 N、P、K 的含量随林火强度增加而增加^[3],而也有研究发现火烧后土壤的 TN 含量随火烧强度增强而降低^[17-19];大部分研究发现火烧后全磷(total phosphorus, TP)、TK 含量增大^[20],中度火烧后土壤全磷含量显著高于重度火烧区和未火烧区^[21],但不同林分间(白桦林(*Betula platyphylla*)、蒙古扁桃林(*Prunus mongolica*)、油松林(*Pinus tabulaeformis*)和草地)TP 无显著差异^[22],而 TK 在不同林分间(华山松 *Pinus armandi*、柏木 *Cupressus funebris*)则差异显著^[23]。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,且一般需要通过多次试验才能得出结论。

本研究地(湘潭、昭山)属于亚热带季风气候区,试验地林分具有典型的亚热带植被特征,森林面积大,火灾频发,刀耕火种导致本区域内原始植被和次生植被遭受人为破坏严重。实验选取 1 种阔叶林(枫香次生林)和 3 种常见针阔混交林(马尾松-木荷混交林、杉木-木荷混交林及檫木-杉木混交林)为实验对象,在不同林分类型内设置不同火强度,通过单次试验同时研究了不同火干扰强度下不同林分内多种土壤理化性质(BD、SWR、pH、SOM、TN、TP 和 TK),比较不同林分内土壤理化性质对火干扰的敏感程度,目的在于探索火干扰强度和林分类型对 BD、SWR、SOM、pH、TN、TP 和 TK 的影响。旨在揭示亚热带不同植被下土壤受不同火强度影响的差异,为不同林分类型确定科学的经营对策,利用火烧促进林分更新,为合理利用森林土壤资源、火烧迹地植被恢复及科学经营和管理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

实验样地位于丰陇(113°04′—113°43′ E, 26°43′—27°06′ N),皇图岭(113°49′—113°51′ E, 27°06′—27°34′ N)和昭山(112°59′3″—113°4′56″ E, 27°54′12″—28°0′55″ N),隶属于湖南省株洲市(皇图岭和丰陇)和湘潭市(昭山)(图 1)。

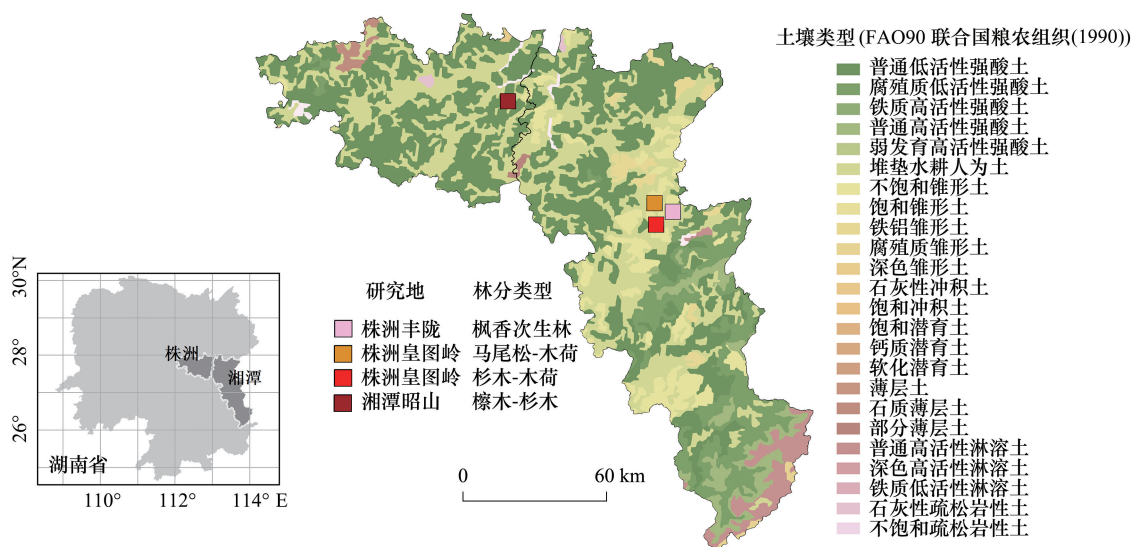


图 1 研究区地理位置及土壤类型概况

Fig.1 Geographical location and soil type of the study area

FAO90:联合国粮农组织 Food and Agriculture Organization of the United Nations (1990)

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 $-11.9\sim 40^{\circ}\text{C}$,年平均气温为 17.8°C ,年平均降水量为 1411 mm 。湘潭也属于亚热带季风气候区,年平均温度约为 17.5°C ,极端最低温度为 -8.5°C ,极端最高温度为 39.3°C ,全年有效积温为 $5180\sim 5320^{\circ}\text{C}$,年平均降水量为 1450 mm ^[24]。4种林分的土壤特性相似(表 1),表层土都为红壤或黄壤,土壤类型根据 FAO/UNESCO Taxonomy 进行分类,土壤性质如表 1 所示^[25-26]。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置和火处理

2014 年 12 月本实验在丰陇、皇图岭和昭山 3 个采样点共选择 4 种林分类型:(1)丰陇的枫香 *L. formosana* (简称:Lf);(2)皇图岭的马尾松-木荷 *P. massoniana*-*S. superba* (简称:PS)(3)皇图岭的杉木-木荷

C. lanceolata-*S. superba* (简称:CS);(4)昭山的檫木-杉木 *S. tsumu*-*C. lanceolata* (简称:SC),样地内各林分的具体特征如表 2^[24,27] 所示。

表 1 试验地土壤性质*

Table 1 Soil properties of the study area

分类 Category	属性 Attribute	表层土 Topsoil	下层土 Subsoil
主要土壤类型 Main soil type	土壤单位符号 (FAO 90)	ALh 和 ACh	
	中国土壤分类中的土壤类群	黄壤和红壤	
	FAO/UNESCO 分类法	普通高活性强酸土和普通低活性强酸土	
土壤性质 Soil properties	土层深度/cm	60—100	
	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
	粘粒含量/%	25.36—29.03	30.74—37.19
	土壤容重/(kg/m ³)	1.37—1.42	1.33—1.36
	有机碳/(% weight)	0.94—4.53	0.43—1.26
	pH(H ₂ O)	4.84—6.63	4.90—6.71

* 数据集由兰州寒旱区科学数据中心提供 (<http://westdc.westgis.ac.cn>);FAO/UNESCO:联合国粮农组织/世界联合国教科文组织;ALh:普通高活性强酸土;ACh:普通低活性强酸土

表 2 研究地林分特征

Table 2 Characteristics of the forest in study sites

特征 Characteristics	样地 Sites			
	枫香林 <i>Lf</i> <i>Liquidambar formosana</i>	马尾松-木荷 <i>PS</i> <i>Pinus massoniana</i> - <i>Schima superba</i>	杉木-木荷 <i>CS</i> <i>Cunninghamia lauceolata</i> - <i>Schima superba</i>	檫木-杉木 <i>SC</i> <i>Sassafras tsumu</i> - <i>Cunninghamia lanceolata</i>
位置 Location	丰陇(株洲)	皇图岭(株洲)	皇图岭(株洲)	昭山(湘潭)
密度 Density(株/hm ²)	1300	2000	1400	1600
林龄 Stand age	17	9	6	6
胸径 Diameter at breast height/cm	14	9.2	9.7	12
树高 Mean tree height/m	10.3	5.4	6.1	6.6
主要树种 Dominant species	枫香(<i>Liquidambar formosana</i>), 马尾松(<i>Pinus massoniana</i>)	马尾松(<i>Pinus massoniana</i>),木荷(<i>Schima superba</i>), 鹅掌楸(<i>Liriodendron chinense</i>), 红豆杉(<i>Taxus chinensis</i>)	杉木(<i>Cunninghamia lauceolata</i>), 木荷(<i>Schima superba</i>), 鹅掌楸(<i>Liriodendron chinense</i>), 红豆杉(<i>Taxus chinensis</i>)	檫木(<i>Sassafras tsumu</i>), 杉木(<i>Cunninghamia lanceolata</i>),马尾松(<i>Pinus massoniana</i>), 湿地松(<i>Pinus elliotii</i>)

火烧实验成本大且破坏森林、污染环境,目前也有类似研究未重复火烧实验^[23, 28]。因此本研究在每种林分中选取 4 块标准样地,取样前在各林分(*Lf*、*PS*、*CS*、*SC*)中分别设置了 4 种火强度:对照(无火干扰)、低、中、高强度火(表 3),共设置了 16 块样地,各样地面积均为 20 m×20 m。火烧时的具体操作如司绍兵^[29]所示,样地内火烧强度均一,设有金属花杆在燃烧样地,根据火焰高度判断火强度,<1.5 m 为低强度火、1.5—3 m 为中强度火,>3 m 为高强度火,各种强度火烧实验特征如表 3 所示。对于年龄较小林分,在火烧前进行人工修枝、割灌,将中间可燃物降到地表,以防发生树冠火。所有的火处理在 2014 年 12 月 23 日完成。

1.2.2 土壤取样

土壤样本全部取自 4 种林分的对照样地(未火烧)和 3 个火烧样地内(低、中等和高强度火)。在每个样地内对 0—20 cm 层(0—5、6—10、11—15、16—20 cm)的土壤用 72 mm×52 mm 的不锈钢环刀进行采样,同时对样本进行标记,并在实验室中进行均质化。

每个未火烧样地内采集 4 个土壤样本,取样时间为 2014 年 12 月 23 日。

表 3 火干扰实验特征
Table 3 Summary the characteristics after the prescribed burns experiment

特征 Characteristics	火强度 Fire levels			
	对照 Control	低 Low	中 Moderate	高 High
火烧强度 Fire intensity levels	未火烧	低强度火	中强度火	高强度火
火烧类型 The general type of fires	—	地表火	地表火	地下火和树冠火
火焰高度 Flame height	—	<1.5 m	1.5—3.0 m	>3 m
严重程度 Severity	植物无火干扰	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
火强度水平 Fire intensity levels	—	地表枯落物、苔藓和草本被烧焦或受较大影响	地表枯落物、苔藓和草本被烧焦或受较大影响	所有地表枯落物和土壤有机碳层受极大影响
燃烧等级 Class burn severity	—	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

在火烧样地进行取样时,每个样地沿对角线设置 3 个土壤剖面,在 4 种林分的每个样地内采集了 60 个样本(4 层土壤,5 个时间节点,3 个土壤剖面)。5 个时间节点分别为火烧后 3 天(2014.12.26)、1 个月(2015.01.24)、6 个月(2015.06.27)、12 个月(2015.12.24)、24 个月(2016.12.24)。现有研究发现火烧后土壤理化性质受时间节点^[13]和土层深度的影响^[11,30],本实验设计时为了排除时间节点、土层深度对实验结果的影响,将这两个因素考虑在内进行取样。研究地在取样期间无持续性的强降雨现象,土壤理化性质受影响较小,因此本研究中没有考虑降雨等因素对土壤理化性质产生的影响。

1.2.3 实验方法

在实验室中,土壤被分成 3 部分进行不同的分析:

环刀法测定 BD(g/cm³)。SWR(Log₁₀WDPT, s)通过滴水穿透时间法进行测定^[31],各采样点的土壤样品在风干室内干燥 24 h(温度 20℃,相对湿度 50%),以排除大气湿度变化对 SWR 的潜在影响^[32]。

土壤样品在室内干燥 24 h,然后粉碎分成两份,分别过 0.15 mm(用于 SOM)和 2 mm(用于 pH)筛备用。SOM(%)采用有机碳重铬酸盐快速氧化法测定^[33]。土壤 pH 值通过玻璃电极法测定(水土比为 2.5:1)(Systronics, India; Model 335)。

土壤样品在 60℃下干燥 24 h,分成两份,分别过 0.25 mm(用于 TN)和 0.15 mm(用于 TP、TK)筛以备用。对样品 TN、TP 和 TK 进行分析时,土壤 TN(%)用凯氏定氮法^[34]测定。土壤 TP(g/kg)通过浓硫酸—高氯酸法测定。TK(g/kg)采用中性乙酸铵法^[35]提取,之后用火焰光度计进行测定。

1.2.4 统计分析

本论文中进行数据分析时 5 次取样的数据作为单个样本做重复方差分析。采用 SPSS 11.5 统计软件对 *Lf*、*PS*、*CS* 和 *SC* 在不同火干扰后 7 种土壤理化性质(BD、SWR、pH、SOM、TN、TP 和 TK)数据进行分析、制作箱型图并进行差异性显著检验。分析方法包括描述性统计分析、单因素方差分析和 Fisher LSD 检验($P<0.05$)。相同字母代表差异不显著($P<0.05$),箱型图中的大写字母(A、B、C)表示在每个特定的火烧处理后不同林分间无显著性差异,表格中大写字母(A、B、C)表示同一林分类型下不同火干扰间无显著性差异。

2 结果与分析

2.1 BD 和 SWR

BD(g/cm³),SWR(Log₁₀WDPT,s)在不同火干扰强度(未火烧、低、中、高)下 4 种林分(*Lf*、*PS*、*CS*、*SC*)均表现出不同程度的差异(表 4 和图 2)。BD 和 SWR 在同一林分内随着火强度的增大呈增加的趋势,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。BD 在不同火烧后 *CS* 与其他林分

(*Lf*、*PS*、*SC*) 均存在显著性差异, 而 *SWR* 在火干扰后林分间差异不显著 ($P < 0.05$)。

表 4 不同火干扰下 4 种森林类型土壤特性*

Table 4 Soil characteristics at sites of four forest types under different fire disturbances

土壤性质 Soil properties **	火等级 Fire levels	样地 Site							
		<i>Lf</i>		<i>PS</i>		<i>CS</i>		<i>SC</i>	
		样本量 N	均值±标准差 Mean±SD	样本量 N	均值±标准差 Mean±SD	样本量 N	均值±标准差 Mean±SD	样本量 N	均值±标准差 Mean±SD
土壤容重	未火烧	4	1.27±0.02AB	4	1.24±0.02AB	4	1.17±0.11ABC	4	1.26±0.02AB
BD/(g/cm ³)	低强度	60	1.26±0.03A	60	1.24±0.02A	60	1.17±0.10A	60	1.25±0.03A
	中强度	60	1.28±0.02B	60	1.26±0.02B	60	1.21±0.07B	60	1.27±0.02B
	高强度	60	1.30±0.03	60	1.28±0.03	60	1.25±0.06C	60	1.28±0.03
斥水性 <i>SWR</i> (Log ₁₀ WDPT, S)	未火烧	4	0.23±0.29A	4	0.64±0.20AB	4	0.44±0.19A	4	0.54±0.28A
	低强度	60	0.69±0.54AB	60	0.91±0.47A	60	0.83±0.51A	60	0.88±0.51A
	中强度	60	0.87±0.61BC	60	1.03±0.54AB	60	1.04±0.52B	60	1.02±0.58AB
	高强度	60	1.00±0.61C	60	1.16±0.55B	60	1.15±0.55B	60	1.14±0.58B
pH	未火烧	4	4.54±0.13A	4	4.27±0.13AB	4	4.29±0.11AB	4	4.21±0.13A
	低强度	60	4.61±0.15A	60	4.37±0.14A	60	4.40±0.11A	60	4.34±0.17A
	中强度	60	4.7±0.22A	60	4.53±0.26B	60	4.56±0.19B	60	4.49±0.27
	高强度	60	4.98±0.49	60	4.80±0.47	60	4.94±0.54	60	4.65±0.36
土壤有机质 SOM/%	未火烧	4	3.39±0.90A	4	1.53±0.66A	4	2.09±1.06A	4	1.44±1.06AB
	低强度	60	3.08±0.36A	60	1.4±0.38A	60	1.83±0.53A	60	1.29±0.70A
	中强度	60	2.87±0.34	60	1.31±0.35A	60	1.68±0.42A	60	1.20±0.59AB
	高强度	60	2.53±0.48	60	1.13±0.32	60	1.47±0.30	60	1.04±0.50B
全氮 TN/%	未火烧	4	0.2±0.06AB	4	0.12±0.03AB	4	0.25±0.04ABC	4	0.09±0.03A
	低强度	60	0.21±0.06A	60	0.12±0.03A	60	0.26±0.05A	60	0.09±0.03A
	中强度	60	0.19±0.04B	60	0.11±0.02B	60	0.24±0.03B	60	0.08±0.03A
	高强度	60	0.18±0.05B	60	0.1±0.02 B	60	0.22±0.04C	60	0.09±0.08A
全磷 TP /(g/kg)	未火烧	4	0.26±0.03AB	4	0.22±0.04ABC	4	0.32±0.04ABC	4	0.10±0.01A
	低强度	60	0.26±0.02A	60	0.22±0.03A	60	0.32±0.04A	60	0.09±0.02A
	中强度	60	0.25±0.02B	60	0.21±0.03B	60	0.31±0.03B	60	0.09±0.01A
	高强度	60	0.23±0.03	60	0.19±0.04C	60	0.29±0.04C	60	0.09±0.02A
全钾 TK /(g/kg)	未火烧	4	7.33±0.92A	4	6.39±0.95A	4	6.34±0.47A	4	7.11±1.1A
	低强度	60	7.32±0.76A	60	6.36±0.77A	60	6.33±0.38A	60	7.05±0.92A
	中强度	60	7.39±0.74A	60	6.41±0.76A	60	6.39±0.43A	60	7.14±0.92A
	高强度	60	7.45±0.81A	60	6.44±0.83A	60	6.42±0.53A	60	7.19±1.01A

* 单因素方差分析, Fisher LSD 检验; 表中大写字母表示土壤性质在同一个森林类型不同火强度之间没有显著的差异 ($P < 0.05$); ** BD: 土壤容重 Bulk density; *SWR*: 土壤斥水性 Soil water repellency; pH: pH 值; SOM: 土壤有机质 Soil organic matter; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium

BD 在同一林分内, 低、中强度火干扰后与未火烧都不存在显著性差异, 这一结果在 4 种林分中都存在 (表 4 和图 2); BD 在低强度火干扰后 *Lf*、*PS*、*SC* 与未火烧间均存在显著性差异 ($P < 0.05$); 与未火烧相比, BD 仅在 *CS* 中火烧前后不存在显著性差异 ($(1.17 \pm 0.10) \text{ g/cm}^3$, $(1.21 \pm 0.07) \text{ g/cm}^3$, $(1.25 \pm 0.06) \text{ g/cm}^3$, $P < 0.05$)。BD 在同一林分内火烧 (低、中、高) 后不同火烧强度之间都存在显著性差异。BD 在不同林分中对火干扰的响应趋势是一致的 (随火强度升高而变大), 且 *CS* 受火强度的影响最显著 (BD 由低强度火后的 $(1.17 \pm 0.1) \text{ g/cm}^3$ 变化为高强度火后的 $(1.25 \pm 0.06) \text{ g/cm}^3$)。BD 在没有火干扰时, 仅林分 *Lf* ($(1.27 \pm 0.02) \text{ g/cm}^3$) 显著大于林分 *CS* ($(1.17 \pm 0.11) \text{ g/cm}^3$) ($P < 0.05$)。然而, BD 在同一火烧后 4 种林分类型间的相互差异没有变化, 即 BD 在 *CS* 内显著小于其他三种林分 ($P < 0.05$), *Lf* 显著大于 *PS* ($P < 0.05$)。

SWR 在 4 种林分中均表现为未火烧时与低强度火干扰后不存在显著性差异 ($P < 0.05$, 表 4)。*SWR* 在中

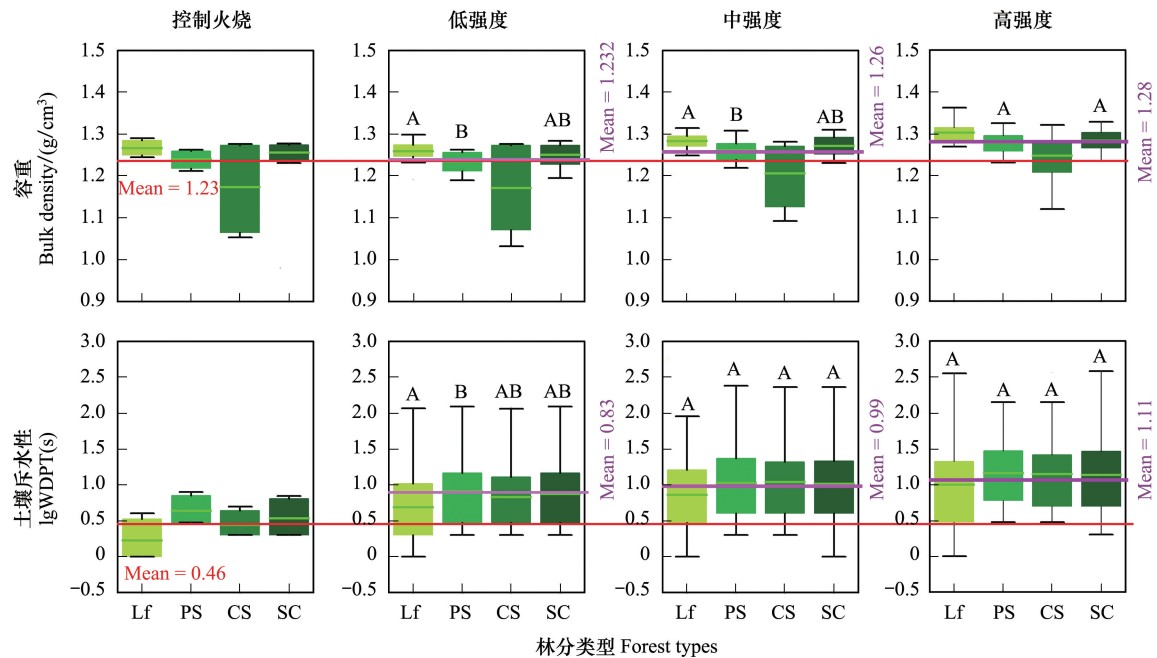


图2 不同火干扰下4种林分土壤容重(BD)和土壤斥水性(SWR)(平均值±标准差)

Fig.2 Bulk density (BD) and soil water repellency (SWR) of four forests under different fire disturbances (Mean±SD)

土壤容重、土壤斥水性;森林类型以不同的绿色表示:Lf(黄绿色)=枫香林 *Liquidambar formosana*、PS(中海蓝)=马尾松-木荷 *Pinus massoniana-Schima superba*、CS(绿色)=杉木-木荷 *Cunninghamia lauceolata-Schima superba* 和 SC(深绿色)=樟木-杉木 *Sassafras tzumu-Cunninghamia lanceolata*;不同的红色线条表示不同的均值:对照(红色)、低强度火烧(浅品红)、中强度火烧(品红)、高强度火烧(紫红色);上面相同的大写字母表示在每个特定的火烧处理后不同林分间没有显著差异(单因素方差分析, Fisher LSD 检验, $P < 0.05$)

强度火干扰后 Lf (0.87 ± 0.61)、CS (1.04 ± 0.52) 显著大于未火烧时 (Lf: 0.23 ± 0.29 ; CS: 0.44 ± 0.1), 中强度火烧后 Lf 相对于火烧前增大 2.8 倍, 中强度火烧后 CS 是未火烧时的 2.4 倍; SWR 在 PS、SC 内中强度火烧后与未火烧之间不存在显著性差异。SWR 在高强度火烧后 PS、CS 和 SC 都显著大于未火烧前, 仅 Lf 高强度火干扰后与未火烧间不存在显著性差异 (SWR 在未火烧和高强度火烧的值分别是 0.23 ± 0.29 和 1 ± 0.61)。SWR 在中强度火干扰后 4 种林分 (Lf、PS、CS、SC) 与低强度、高强度火烧后都不存在显著性差异。SWR 在高强度火烧后 4 种林分均显著大于低强度火干扰 ($P < 0.05$)。在同一火干扰下, SWR 在 4 种林分内都不存在显著性差异 (除了 PS 在未火烧和低强度火后的 SWR 显著高于 Lf, $P < 0.05$, 图 2)。

2.2 SOM 和 pH

SOM (%)、pH 在不同火干扰后, 4 种林分均表现出不同程度的差异 (表 4, 图 3)。SOM 随着火强度的增加, 4 种林分均表现出减少的趋势; 反之, 土壤 pH 均表现出增加的趋势 (表 4)。

SOM 的值在同一林分内随火强度的增大而减少 (表 4), 这一趋势在 4 种林分中都存在。SOM 在同一林分内, 未火烧与低强度火干扰间不存在显著性差异; SOM 在中强度火干扰后 ($2.87\% \pm 0.34\%$) 仅 Lf 与未火烧时 ($3.39\% \pm 0.90\%$) 存在显著性差异; SOM 在高强度火干扰后仅 SC 与未火烧时不存在显著性差异 ($P < 0.05$)。在火干扰后, SOM 在低强度火烧后仅 Lf 与中强度火烧后存在显著性差异 (中强度是低强度火烧的 93.1%); SOM 在同一林分内, 高强火烧后显著小于低强度、中强度火烧 (除 SC 在中强度和高强度火烧间无显著差异)。SOM 在火烧前 Lf 显著大于 PS、SC, SOM 在不同强度火干扰后均表现为 Lf、CS 显著大于 PS、SC, 且 Lf 显著大于 CS (图 3, $P < 0.05$)。

pH 的值在同一林分内随火强度的增大而增大 (表 4), 这一趋势在 4 种林分中都存在。pH 在 4 种林分内都表现为低强度火干扰后与火烧前不存在显著性差异; pH 在中强度火干扰后仅 SC 与火烧前存在显著性差异 ($P < 0.05$); pH 在高强度火烧后 4 种林分 (Lf、PS、CS、SC) 与火烧前均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。pH 在火

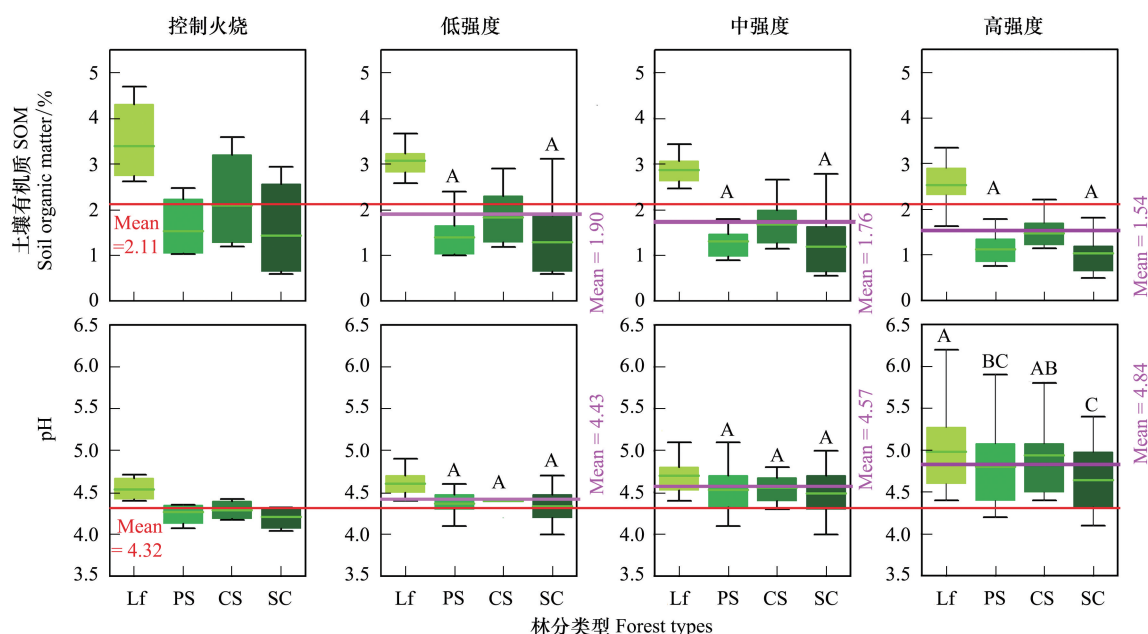


图3 不同火干扰下4种林分土壤有机质(SOM)和pH(平均值±标准差)

Fig.3 Soil organic matter (SOM) and pH of four forests under different fire disturbances (Mean±SD)

土壤有机质、pH值;森林类型以不同的绿色表示:Lf(黄绿色)=枫香林 *Liquidambar formosana*、PS(中海蓝)=马尾松-木荷 *Pinus massoniana-Schima superba*、CS(绿色)=杉木-木荷 *Cunninghamia lauceolata-Schima superba* 和 SC(深绿色)=樟木-杉木 *Sassafras tzumu-Cunninghamia lanceolata*;不同的红色线条表示不同的均值;对照(红色)、低强度火烧(浅品红)、中强度火烧(品红)、高强度火烧(紫红色);上面相同的大写字母表示在每个特定的火烧处理后不同林分间没有显著差异(单因素方差分析,Fisher LSD 检验, $P<0.05$)

干扰后,同一林分在低、中、高火强度干扰后相互间存在显著性差异(除 Lf 在低强度(4.61 ± 0.15)和中强度(4.7 ± 0.22)火干扰间不存在显著差异, $P<0.05$)。土壤 pH 在不同火干扰条件下均表现为 Lf 最大,SC 最小;pH 除在高强度火干扰下,Lf 都显著大于其他林分。土壤 pH 在高强度火的干扰下,Lf 显著大于 PS、SC(4.98 ± 0.488 , 4.8 ± 0.470 , 4.645 ± 0.36 , $P<0.05$),林分 CS 显著大于 SC(CS: 4.94 ± 0.54 ;SC: 4.65 ± 0.36 ,图 3, $P<0.05$)。

2.3 TN、TP 和 TK

土壤 TN(%)、TP(g/kg)、TK(g/kg)在不同火干扰强度(未火烧、低、中、高)下,4种林分均表现出不同程度的差异(表 4,图 4)。土壤 TN 在同一林分下不同火干扰(未火烧、低、中、高)间变化不大;TP 随火干扰强度增大而表现出下降的趋势(除 SC);反之,TK 随火烧强度增加而表现出上升的趋势(表 4)。

TN 在同一林分中火烧前后不存在显著性差异,这一结果在 4 种林分中一致。TN 在火干扰后,同一林分在中强度和高强度火烧后均显著小于低强度火烧(除 SC 外, $P<0.05$);TN 在同一林分内,中强度和高强度火烧后不存在显著性差异(除 CS 外)。TN 在相同火干扰条件下,4 种林分都表现为 $CS>Lf>PS>SC$ (图 4)。土壤全 N 在未火烧条件下,CS($0.25\%\pm0.04\%$)和 Lf($0.2\%\pm0.06\%$)均显著大于 PS($0.12\%\pm0.03\%$)和 SC($0.09\%\pm0.03\%$)(CS、Lf 分别是 PS、SC 的 2.1 倍,2.8 倍,1.8 倍和 2.3 倍)。土壤 TN 在火干扰后(低、中、高),同一火强度下不同林分相互之间都存在显著性差异(除高强度火烧后 PS($0.1\%\pm0.02\%$)和 SC($0.09\%\pm0.08\%$)之间无显著性差异, $P<0.05$)。

TP 在同一林分内,火烧前后不存在显著性差异,这一结果在 4 种林分中一致(除 Lf 在高强度(0.23 ± 0.03) g/kg 火烧后显著小于未火烧(0.26 ± 0.03) g/kg,表 4);TP 在同一林分内,火干扰后不同火强度之间都存在显著性差异(除 SC 在不同火强度下无显著差异, $P<0.05$)。TP 与 TN 一样在相同火烧条件下都表现为 $CS>Lf>PS>SC$ (表 4)。TP 含量在未火烧时,仅林分 Lf(0.26 ± 0.03) g/kg 和 PS(0.22 ± 0.04) g/kg 之间不存在显著性差异;TP 在火烧后,4 种林分相互之间都存在显著性差异($P<0.05$,图 4)。

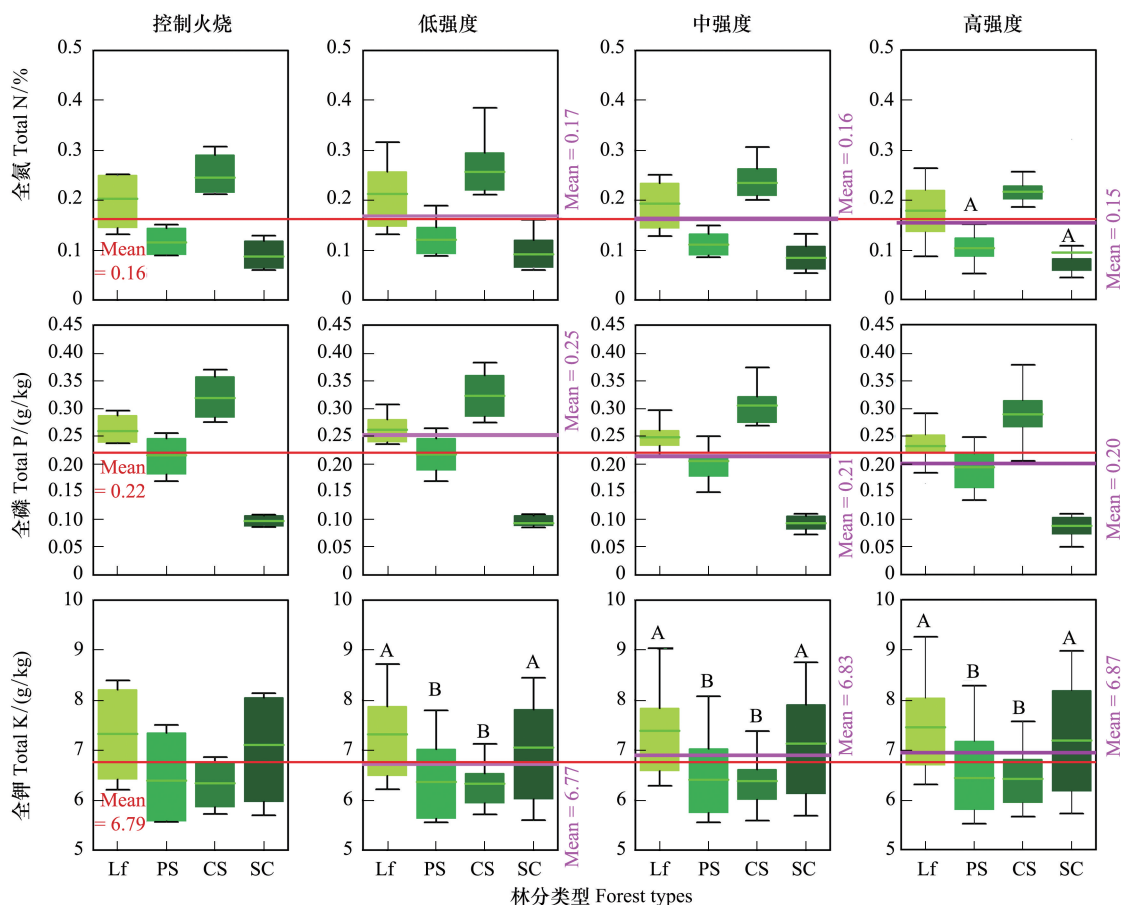


图4 不同火干扰下4种林分土壤全氮(TN)、全磷(TP)和全钾(TK)(平均值±标准差)

Fig.4 Soil total N (TN), total P (TP) and total K (TK) of four forests under different fire disturbances (Mean±SD)

全氮、全磷、全钾;森林类型以不同的绿色表示:Lf(黄绿色)=枫香林 *Liquidambar formosana*、PS(中海蓝)=马尾松-木荷 *Pinus massoniana-Schima superba*、CS(绿色)=杉木-木荷 *Cunninghamia lauceolata-Schima superba* 和 SC(深绿色)=樟木-杉木 *Sassafras tzumu-Cunninghamia lanceolata*;不同的红色线条表示不同的均值;对照(红色)、低强度火烧(浅品红)、中强度火烧(品红)、高强度火烧(紫红色);上面相同的大写字母表示在每个特定的火烧处理后不同林分间没有显著差异(单因素方差分析, Fisher LSD 检验, $P < 0.05$)

TK 在同一林分内,相对于未火烧,低强度火烧后 TK 含量轻微降低,中、高强度火烧使其含量升高,但不同火干扰下相互之间都不存在显著性差异($P < 0.05$),这一趋势在4种林分中一致。TK 在同一火干扰条件下,不同林分都表现为 $Lf > SC > PS > CS$ (图4)。TK 在未火烧时,林分之间都不存在显著性差异;TK 在火干扰后, *Lf* 和 *SC* 都显著大于 *PS*、*CS*。

3 讨论

3.1 BD 和 SWR 的变化

研究发现 BD、SWR 都随火强度的增大呈增大趋势,尤其在高强度火烧后显著增大。SWR 相对于 BD 受火干扰影响更大。已有研究发现不同强度火烧可以增加^[11, 36-37],减少^[38]或者并不影响^[39]林分的 SWR。例如:Doerr 等^[39]于1998年发现低强度火对葡萄牙的桉树(*Eucalyptus robusta*)和松树(*Pine*)林中的 SWR 没有影响。而 BD 在火烧后变小,但是火烧前后没有显著性差异^[40],这与本研究结论存在差异。Letey^[11]于2001年发现土壤斥水性随火强度的增大而增大,因为火烧会破坏草地的土壤斥水性,这一影响在高强度火干扰下更加明显,土壤容重也会因火烧后土壤有机矿物团聚体增加而增加^[17],这些与本研究趋势一致。

研究发现 BD 受高强度火烧影响显著。火干扰后 BD 在同一林分不同火强度间均存在显著性差异;火烧

前后,CS 中 BD 都显著小于其他 3 种林分(Lf、PS、CS),说明 BD 受林分类型影响。有研究则表明,BD 在火烧前后以及不同火强度之间无显著差异或显著降低^[10]。例如,Diaz-Ferros 等^[41]于 1990 年和 Xue 等^[40]研究发现,在火烧后土壤中 BD 降低,但是 BD 在火烧与未火烧样地内没有显著性差异。辛颖等^[14]发现火烧前后 BD 无显著差异,且火烧后 BD 在针叶林中高于阔叶林。研究还发现,BD 在耕地中比其他农用地(作物残余物焚烧后的农田和火烧迹地)高,但是火烧后显著降低^[10]。然而 BD 在地带性阔叶林中显著低于人工针叶林(*C. lanceolata*)^[9]。此外,有研究则发现没有火干扰时 BD 在林分间的差异与土层深度及树种有关,不同样地间,白桦次生林第 1 层土壤容重最低,第 2 和 3 土层的土壤容重与其他样地无显著性差异^[22],这与本研究结论不同。孙明学^[42]则发现低强度火烧对大兴安岭地区各种林型土壤容重的影响差异性不大,这与本研究结论不同,主要是因为研究的林分以落叶松混交林为主。

许多研究表明,SWR 在火烧后增大、减小或者没有变化,这些都是因为其受火强度、火持续时间、立地类型,特别是土壤深度的影响。MacDonald 等^[43]于 2004 年发现的结论与本研究一致,其发现 SWR 随火强度的增大而显著增大,但随着土层深度的增大火的影响逐渐变小。本研究中发现火强度越大 SWR 受影响越显著(除 PS);火烧后,SWR 在低强度和高强度火烧后有显著差异。有研究发现斥水性土层的厚度取决于火烧强度^[44],在林分中,火烧会导致斥水性物质的强化和易位^[45]。研究发现火烧区域出现极端斥水性^[37],这一结论与本研究不完全一致主要是因为研究的时间节点不一致。在低强度火烧区,SWR 高于未火烧区,但无显著差异;但是中度和高强度的火烧显著增加斥水性^[46],因为研究的林分是针阔混交林,这与本研究的结果一致。然而 Glenn 和 Finley^[36]于 2010 年发现,土壤的入渗速率在中强度火烧后显著大于高强度火烧,进一步发现土壤斥水性在中强度火烧后比其他强度火烧后都大,这是因为研究样地主要是灌木区和草地。Scotter^[47]发现人工林中林火引起表层土壤斥水性物质被烧毁,而下层土壤斥水性则增强。Jordan 等^[38]于 2011 年发现中强度的火烧导致 SWR 增大,高强度火烧破坏土壤疏水性。本研究则发现同一火干扰下,SWR 在 4 种林分间都不存在显著性差异,表明 SWR 受森林类型影响小。而其他研究则发现土壤斥水性在纯林分内显著低于混交林分样地^[48]。SWR 在沙洲橡树林(*Holm oaks*)内显著低于松树(*Pines*)和桉树林(*Eucalyptus robusta*)^[49]。

3.2 SOM 含量和 pH 值

有许多关于 SOM 的研究都认为火干扰对其有影响,有部分认为火烧减少了 SOM 含量^[1,15,50-51],也有部分认为 SOM 随火强度增大而增大^[4,52-53]。本研究发现 SOM 在各林分内都随火强度的增大而减少。这与 Certini^[1]于 2005 发现的研究结果一致,其发现由于高温导致土壤有机质的分解,在重度火灾发生后,SOM 会减少。相反,有研究则发现土壤有机碳在火烧迹地中最大^[10],如 Trabaud^[52]发现 SOM 在火烧后增加。本研究发现,随火强度增大各林分 SOM 与火烧前的差异逐渐变大,Lf、PS、CS 中 SOM 受高强度火的影响较显著。低强度的计划火烧通常不会导致土壤有机碳发生较大的变化,但重度火烧可导致土壤碳的大量损失^[50],这与本研究结论一致。Stromgaard^[53]则发现由于未燃烧或部分燃烧的碎片被混入土壤中,SOM 在轻度至中度火烧期间逐渐增加。在兴安落叶松林内重度火烧区土壤有机碳含量显著高于其他火烧区($P < 0.05$),同时表现为重度>中度>轻度^[6]。本研究发现 SOM 在火烧前后均表现为 Lf 显著大于 PS、SC,说明 SOM 含量受林分类型的影响,阔叶林内 SOM 最大。有研究与本研究一致,低强度火干扰后不同林型的土壤有机质之间都存在显著性差异^[42]。有研究发现高强度火干扰后,土壤有机质含量白桦林(*Betula platyphylla*)最大,主要是因为林下枯落物的增加和分解,及时补充了土壤表层有机质,而樟子松林(*Pinus sylvestris*)枯落物少,所以有机质含量最低^[14],这与本研究发现的次生阔叶林中 SOM 最大的结论大致相同。有研究则发现在不同样地间有机质含量没有显著差异^[54]。

目前大部分研究发现火烧导致土壤 pH 增大^[21,55-57],但也有研究发现火烧对林分 pH 的影响不大^[58];且大部分结论发现阔叶林大于针叶林^[9,14]。本研究发现各林分 pH 都随火强度增大而增大;与未燃烧区相比,pH 值在高强度火烧后显著增大,说明高强度火烧对土壤 pH 值影响显著。火烧后,同一林分 pH 在不同火干扰间差异显著,表明不同强度火烧对林分影响差异较大。有研究也发现与未被火烧的样地相比,火烧后样地

的 pH 值增加^[47]。Hesammi 等^[55]发现燃烧作物残茬后土壤 pH 值升高,这是因为土壤有机酸被分解,金属离子含量增加^[13]。赵彬等^[6]发现轻度火烧对土壤 pH 无影响,中度和重度火烧区 pH 值显著高于未火烧区,这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,这些与本研究结论大概一致。然而辛颖等^[14]则发现高强度火干扰后,与对照样地相比,樟子松林土壤 pH 值升高,其他林分土壤 pH 值均降低。在高强度火烧后,pH 值会升高,因为燃烧时在灰烬中释放出碱性离子,有机酸也会随着加热而变性^[59],这些结果都与本研究结果部分一致。有部分研究与本研究存在差异,火烧 1 年后土壤 pH 显著升高,之后 pH 值逐渐下降^[40],是因为研究的年限及火烧强度与本研究不一致。同时本研究发现不同火干扰条件下 pH 均表现 *Lf* 为显著大于其他林分(除高强度火烧),其他 3 种针阔混交林相互之间不存在显著性差异,这表明 pH 受林分类型影响显著。大多数结论认为阔叶林的 pH 值大于针叶林^[14,58]。土壤 pH 值秸秆焚烧后的农田内显著高于耕地^[10]。而低强度火干扰下,针叶林的土壤 pH 之间不存在显著性差异^[23,42]。有研究则发现,大兴安岭的两种林分高强度火干扰后,土壤 pH 在落叶松中大于白桦林^[21]。未火烧时木荷纯林(*Schima superba*)的土壤 pH 小于马尾松(*Pinus massoniana*),这是因为木荷纯林导致酸化加剧^[60]。

3.3 TN、TP 和 TK

本研究发现土壤 TN、TP、TK 受林分类型和火干扰强度的影响存在差异。已有研究也认为火灾对土壤化学性质的影响有显著性的差异^[40],土壤有效养分同时受时间节点和林分类型的影响。

本研究发现土壤 TN 火烧前后不存在显著差异;仅低强度火烧显著大于中、高强度火烧(除 SC 外);在同一火烧强度下,TN 在不同林分之间普遍存在显著差异。表明与未火烧相比,火烧对 TN 影响较小,但林分类型对 TN 有显著影响。目前有研究也认为火干扰对土壤全氮含量无显著影响^[61],这与本研究结论相似。然而,大多数研究发现 TN 在火烧后增加或减少。例如,Covington 和 Sackett^[62]发现土壤全氮含量在火烧后增大。Miesel 等^[63]也发现火烧后森林土壤氮含量增加。土壤 TN 随着火烧强度从低到中逐渐增大^[18]。重度火烧区土壤全 N 含量显著高于其他火烧区,即重度>中度>轻度,这可能是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,从而刺激了土壤氮含量的增加^[6]。与之相反,Bell 和 Binkley^[64]指出火干扰导致松树林中 TN 的减少,上方 2 cm 厚灰烬土内 TN 含量较相邻未火烧森林减少了 25%^[15]。与未开垦的草地相比,长时间的耕作加上焚烧残余物严重耗尽耕地的 TN,与邻近的原始森林相比,每年进行焚烧作业的草地土壤 TN 下降幅度较大^[65]。没有火干扰时,土壤全 N 含量总体表现为:阔叶林>针叶林>灌草丛,这与不同林分类型的凋落物量不同有关^[66]。同时有研究发现,高强度火烧后不同林分类型土壤 TN 质量分数为山杨林最高,樟子松林最低,由于樟子松林的土壤有机质含量最低及有机质分解作用强度最弱,所以其 N 含量最低^[14]。有研究则发现低强度火烧后华山松(*Pinus armandii*)和柏木(*Cupressus funebris*)人工林的土壤 TN 含量不存在显著性差异^[23]。在重度火烧地区,黑云杉的 N 含量略高于其他林分(白云杉、白杨和白桦林),不同林分之间没有显著差异^[67]。

本研究发现 TP 与 TN 一样,各林分与火烧前相比,仅 *Lf* 在高强度火烧后显著小于未火烧,而火干扰后不同火强度之间都存在显著性差异(除 SC),说明火强度对 TP 的影响较大。这与 Kutiel 和 Naveh^[15]的说法一致,他们认为火灾导致 TP 降低,原因是火烧使 TP 从植物体和凋落物中释放出来。然而,马尾松林 TP 在火灾发生 4 年后显著降低,并维持不变^[40];也有研究发现炼山后,桉树林表层土壤 TP 含量在 1 周后增大,但 4 个月则低于对照区^[30],这些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。许多研究发现,由于土壤受热和灰分存在^[19],土壤 TP 在火烧后增加^[20]。例如,在火烧后,土壤有效磷含量都比相邻的未火烧林分高^[10]。林火干扰后,中度火烧林土壤全磷含量有显著提高,土壤 TP 含量显著高于重度火烧区和未火烧区,且不同火烧强度间有显著差异^[21],这与本研究部分一致。也有研究发现,与火烧前土壤磷含量相比,火烧后各层磷含量都较高^[68]。本研究发现 TP 含量在未火烧时,仅林分 *Lf* 和 *PS* 之间不存在显著性差异;然而 TP 在火烧后,4 种林分相互之间都存在显著性差异,说明 TP 含量受林分类型的影响较显著。未火烧时,杉木的土壤 P 含量普遍低于 3 种混交林^[69]。全磷通过低强度火烧后损失较少,淋溶损失也少,华山松的全磷含量

显著大于柏木林^[23],这一结论与本文部分一致。然而,许多研究发现 TP 在不同的样地没有显著的差异。例如,Baer 等^[69]研究表明,土壤 TP 在草地和林分之间没有显著差异,这可能与土壤基质的不同而导致植物对养分的选择性利用有关。高强度火干扰后,不同林分类型土壤全 P 含量为兴安落叶松林、山杨林大于白桦林、樟子松林,但林分相互之间均不存在显著性差异^[14]。

本研究发现 TK 在各林分内都随火强度增大而增大,但同一林分 TK 含量在不同火强度间无显著差异,表明火强度对 TK 无显著影响。大部分研究发现火烧后 TK 升高^[20]。Adams 和 Boyle^[70]研究发现,在火灾发生一个月后,有效钾含量明显高于未燃烧的水平,并且在 3 个月后持续增加。Giovannini 等^[17]发现,土壤温度和灰分增加了可萃取钾的含量。Xue 等^[40]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,这与本研究结果部分一致。本研究发现 TK 在同一火烧条件下,不同林分都表现为天然阔叶林(*Lf*)大于针阔混交林。TK 在未火烧时,林分之间都不存在显著性差异;TK 在火干扰后,*Lf* 和 *SC* 都显著大于 *PS*、*CS*,说明 TK 受林分类型影响显著。这与肖灵香等^[71]的结论不同,其发现没有火干扰时,不同林分类型的 K 含量均有明显差异,且大致表现为杉木林低于针阔混交林。低强度火烧后,华山松的全钾含量显著大于柏木林,钾的流动性很强,关于火烧对钾含量影响的原因较少,有待进一步研究^[23]。大兴安岭 2 个典型自然保护区受高强度火干扰后林下针叶林和阔叶林全 K 含量一致^[21],这与本研究结论存在较大差异。

4 结论

火干扰在森林土壤物理和化学性质的变化中发挥重要作用。主要结论如下:

(1) BD、SWR、pH 值和 TK 随火烧强度增加而增加,而 SOM 和 TP 则减少,TN 没有规律性变化。

(2) 高强度火烧对 BD、SWR、SOM 的影响都很显著,而低强度火烧显著影响 TN 含量;TP 和 TK 受火烧影响较小,火烧前后基本无显著差异,但 TP 在火烧后不同火强度之间存在显著性差异。

(3) BD、SOM 和 pH 在火烧前后都表现为 *Lf* 大于其他 3 种林分;TN、TP 和 TK 则表现为 *CS*、*Lf* 大于 *PS*、*SC*;SWR 表现为在 *Lf* 内最小,结果表明纯阔叶林与针阔混交林之间的土壤性质差异明显,除 SWR,其他土壤性质受林分类型的影响显著,尤其 TN、TK 在不同林分间都存在显著性差异。

参考文献 (References):

- [1] Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 2005, 143(1): 1-10.
- [2] 李媛,程积民,魏琳,陈芙蓉. 云雾山典型草原火烧不同恢复年限土壤化学性质变化. *生态学报*, 2013, 33(7): 2131-2138.
- [3] 孔健健,杨健. 林火对大兴安岭落叶松林土壤性质的短期与长期影响. *生态学杂志*, 2014, 33(6): 1445-1450.
- [4] Robichaud P R, Hungerford R D. Water repellency by laboratory burning of four northern Rocky Mountain forest soils. *Journal of Hydrology*, 2000, 231-232: 207-219.
- [5] 刘发林,陈小伟,曾素平,彭早珍. 火干扰对森林土壤斥水性的影响研究进展. *生态学报*, 2019, 39(5): 1846-1852.
- [6] 赵彬,孙龙,胡海清,孙志虎. 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. *自然资源学报*, 2011, 26(3): 450-459.
- [7] Knicker H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. *Biogeochemistry*, 2007, 85(1): 91-118.
- [8] 王鼎,周梅,赵鹏武,王梓璇,舒洋. 重度火干扰对不同林型落叶松林土壤化学性质的影响. *北方园艺*, 2019, (5): 84-89.
- [9] Wang Q K, Wang S L. Soil organic matter under different forest types in Southern China. *Geoderma*, 2007, 142(3/4): 349-356.
- [10] Nigussie A, Kissi E. Impact of biomass burning on selected physicochemical properties of nitisol in Jimma zone, Southwestern Ethiopia. *International Research Journal of Agricultural Science and Soil Science*, 2011, 1(9): 394-401.
- [11] Letey J. Causes and consequences of fire - induced soil water repellency. *Hydrological Processes*, 2001, 15(15): 2867-2875.
- [12] Marafa L M, Chau K C. Effect of hill fire on upland soil in Hong Kong. *Forest Ecology and Management*, 1999, 120(1/3): 97-104.
- [13] Ballard T M. Impacts of forest management on northern forest soils. *Forest ecology and Management*, 2000, 133(1/2): 37-42.
- [14] 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. *东北林业大学学报*, 2013, 41(8): 65-68.
- [15] Kutiel P, Naveh Z. The effect of fire on nutrients in a pine forest soil. *Plant and Soil*, 1987, 104(2): 269-274.
- [16] Hatten J A, Zabowski D, Ogden A, Thies W. Soil organic matter in a ponderosa pine forest with varying seasons and intervals of prescribed burn. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(7): 2555-2565.
- [17] Giovannini G, Lucchesi S, Giachetti M. Effect of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility. *Soil Science*, 1988, 146(4): 255-261.

- [18] McMurtrie R E, Dewar R C. Sustainable forestry: a model of the effects of nitrogen removals in wood harvesting and fire on the nitrogen balance of regrowth eucalypt stands. *Australian Journal of Ecology*, 1997, 22(3): 243-255.
- [19] Gordon D R, Rice K J. Competitive effects of grassland annuals on soil water and blue oak (*Quercus douglasii*) seedlings. *Ecology*, 1993, 74(1): 68-82.
- [20] 张喜, 朱军, 崔迎春, 霍达, 王莉莉, 吴鹏, 陈骏, 潘德权, 杨春华. 火烧对黔中喀斯特山地马尾松林土壤理化性质的影响. *生态学报*, 2011, 31(19): 5809-5817.
- [21] 张玉红, 覃炳醒, 孙铭隆, 周志强. 林火对大兴安岭典型林型林下植被与土壤的影响. *北京林业大学学报*, 2012, 34(2): 7-13.
- [22] 刘永宏, 张立欣, 王伟峰, 王博. 乌拉山自然保护区不同林分类型的土壤特征. *西部林业科学*, 2015, 44(6): 20-25, 37-37.
- [23] 韩钊龙, 胡慧蓉, 黄铄淇. 林火干扰对土壤理化性质的影响. *西南林业大学学报*, 2014, 34(3): 46-50.
- [24] 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. *中南林业科技大学学报*, 2016, 36(6): 46-50.
- [25] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, van Velthuisen H, Verelst L, Wiberg D. Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008). Laxenburg: IIASA, Rome, Italy: Austria and FAO.
- [26] Nachtergaele F, van Velthuisen H, Verelst L. Harmonized World Soil Database. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2008.
- [27] Zhu L, Zhang H Q, Lin H, Jiang X. Study on stand structure visualization based on GDI⁺. *Agricultural Science & Technology*, 2011, 12(1): 144-148.
- [28] 龙海川, 丁超, 李策, 包鹏程, 杜杰, 王卫霞. 中度火干扰下不同火烧时间对喀纳斯泰加林土壤有机碳的影响. *黑龙江农业科学*, 2018, (8): 35-38.
- [29] 司绍兵. 浅谈采伐迹地的炼山方法. *安徽林业科技*, 2009, (3): 46-46.
- [30] 杨尚东, 吴俊, 谭宏伟, 刘永贤, 熊柳梅, 周柳强, 谢如林, 黄国勤. 赵其国. 红壤区桉树人工林炼山后土壤肥力变化及其生态评价. *生态学报*, 2013, 33(24): 7788-7797.
- [31] Wessel A T. On using the effective contact angle and the water drop penetration time for classification of water repellency in dune soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1988, 13(6): 555-561.
- [32] Doerr S H, Dekker L W, Ritsema C J, Shakesby R A, Bryant R. Water repellency of soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2002, 66(2): 401-405.
- [33] Walkley A, Black I A. An examination of the degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 1934, 37(1): 29-38.
- [34] Bremner J M, Mulvaney C S. Nitrogen—total//Page A L, Miller R H, Keeney D R, eds. *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties*. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1982: 595-624.
- [35] Merwin H D, Peech M. Exchangeability of soil potassium in the sand, silt, and clay fractions as influenced by the nature of the complementary exchangeable cation. *Soil Science Society of America Journal*, 1951, 15: 125-128.
- [36] Glenn N F, Finley C D. Fire and vegetation type effects on soil hydrophobicity and infiltration in the sagebrush-steppe: I. field analysis. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(6): 653-659.
- [37] Muñoz-Rojas M, Miller B, Tangney R, Miller R, González-Pérez J A, Jiménez-Morillo N T, Zavala L M, Jordán A. Impact of a prescribed fire on soil water repellency in a Banksia woodland (Western Australia). *Geophysical Research Abstracts*, 2016, 18: EGU2016-16926-2.
- [38] Jordán A, Zavala L M, Mataix-Solera J, Nava A L, Alanís N. Effect of fire severity on water repellency and aggregate stability on Mexican volcanic soils. *CATENA*, 2011, 84(3): 136-147.
- [39] Doerr S H, Shakesby R A, Walsh R P D. Spatial variability of soil hydrophobicity in fire-prone eucalyptus and pine forests, Portugal. *Soil Science*, 1998, 163(4): 313-324.
- [40] 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. *Forests*, 2014, 5(12): 2947-2966.
- [41] Díaz-Fierros F, Benito E, Vega J A, Castelao A, Soto B, Pérez R, Taboada T. Solute loss and soil erosion in burnt soil from Galicia (NW Spain)//Goldammer F G, Jenkins M J, eds. *Fire in Ecosystems Dynamics: Mediterranean and Northern Perspectives*. The Hague: SPB, 1990: 103-116.
- [42] 孙明学. 塔河林区林火对土壤性质与植被恢复的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [43] MacDonald L H, Huffman E L. Post-fire soil water repellency. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(5): 1729-1734.
- [44] DeBano L F. Water Repellent Soils: a State of the Art. Berkeley, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment station, 1981: 46-46.
- [45] DeBano L F. Water repellent soils: a worldwide concern in management soil and vegetation. *Agricultural Science Review*, 1969, 7(2): 11-18.
- [46] Gordillo-Rivero Á J, García-Moreno J, Jordán A, Zavala L M, Granja-Martins F M. Fire severity and surface rock fragments cause patchy distribution of soil water repellency and infiltration rates after burning. *Hydrological Processes*, 2014, 28(24): 5832-5843.
- [47] Scotter G W. Effects of forest fires on soil properties in northern Saskatchewan. *The Forestry Chronicle*, 1963, 39(4): 412-421.
- [48] Buczko U, Bens O, Fischer H, Hüttl R F. Water repellency in sandy luvisols under different forest transformation stages in northeast Germany. *Geoderma*, 2002, 109(1/2): 1-18.

- [49] Zavala L M, García-Moreno J, Gordillo-Rivero Á J, Jordán A, Mataix-Solera J. Natural soil water repellency in different types of Mediterranean woodlands. *Geoderma*, 2014, 226-227: 170-178.
- [50] Johnson D W. Effects of forest management on soil carbon storage. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1992, 64(1/2): 83-120.
- [51] 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. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017, 13: 43-57.
- [52] Trabaud L. The effects of different fire regimes on soil nutrient levels in *Quercus coccifera* garrigue//Kruger F J, Mitchell D T, Jarvis J U M, eds. *Mediterranean-Type Ecosystems: The Role of Nutrients*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1983: 233-243.
- [53] Strømgaard P. Immediate and long-term effects of fire and ash-fertilization on a Zambian miombo woodland soil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1992, 41(1): 19-37.
- [54] Adekunle V A J, Dafiewhare H B, Ajibode O F. Microbia population and diversity as influenced by soil pH and organic matter in different forest ecosystems. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2005, 8(10): 1478-1484.
- [55] Hesammi E, Talebi A B, Hesammi A. A review on the burning of crop residue on the soil properties. *WALIA Journal*, 2014, 30(1): 192-194.
- [56] Fultz L M, Moore-Kucera J, Dathe J, Davinic M, Perry G, Wester D, Schwilk D W, Rideout-Hanzak S. Forest wildfire and grassland prescribed fire effects on soil biogeochemical processes and microbial communities: two case studies in the semi-arid Southwest. *Applied Soil Ecology*, 2016, 99: 118-128.
- [57] De Baets S, van de Weg M J, Lewis R, Steinberg N, Meersmans J, Quine T A, Shaver G R, Hartley I P. Investigating the controls on soil organic matter decomposition in tussock tundra soil and permafrost after fire. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 99: 108-116.
- [58] Zhao Y, Wang Y Z, Xu Z H, Fu L. Impacts of prescribed burning on soil greenhouse gas fluxes in a suburban native forest of south-eastern Queensland, Australia. *Biogeosciences*, 2015, 12(21): 6279-6290.
- [59] Scharenbroch B C, Nix B, Jacobs K A, Bowles M L. Two decades of low-severity prescribed fire increases soil nutrient availability in a Midwestern, USA oak (*Quercus*) forest. *Geoderma*, 2012, 183-184: 80-91.
- [60] 李志勇, 陈建军, 王彦辉, 于澎涛, 杜士才, 何萍, 段健. 重庆酸雨区人工木荷林对土壤化学性质的影响. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 632-638.
- [61] Knoepp J D, Swank W T. Comparison of available soil nitrogen assays in control and burned forested sites. *Soil Science Society of America Journal*, 1995, 59(6): 1750-1754.
- [62] Covington W W, Sackett S S. Soil mineral nitrogen changes following prescribed burning in ponderosa pine. *Forest Ecology and Management*, 1992, 54(1/4): 175-191.
- [63] Miesel J R, Hockaday W C, Kolka R K, Townsend P A. Soil organic matter composition and quality across fire severity gradients in coniferous and deciduous forests of the southern boreal region. *Journal of Geophysical Research*, 2015, 120(6): 1124-1141.
- [64] Bell R L, Binkley D. Soil nitrogen mineralization and immobilization in response to periodic prescribed fire in a loblolly pine plantation. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, 19(6): 816-820.
- [65] Ademe Y A. Long-term impacts of cultivation and residue burning practices on soil carbon and nitrogen contents in Cambisols of southwestern Ethiopia. *American Journal of Agriculture and Forestry*, 2015, 3(3): 65-72.
- [66] 黄莉, 吴福忠, 杨万勤, 宋会兴, 陈良华, 谭波, 苟小林, 李志萍. 炼山及遮阳网覆盖对马尾松人工林土壤微生物生物量碳和氮的影响. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(2): 261-267.
- [67] Dyrness C T, van Cleve K, Levison J D. The effect of wildfire on soil chemistry in four forest types in interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, 19(11): 1389-1396.
- [68] Fonseca F, de Figueiredo T, Nogueira C, Queirós A. Effect of prescribed fire on soil properties and soil erosion in a Mediterranean mountain area. *Geoderma*, 2017, 307: 172-180.
- [69] Baer S G, Kitchen D J, Blair J M, Rice C W. Changes in ecosystem structure and function along a chronosequence of restored grasslands. *Ecological Applications*, 2002, 12(6): 1688-1701.
- [70] Adams P W, Boyle J R. Effects of fire on soil nutrients in clearcut and whole-tree harvest sites in central Michigan. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(4): 847-850.
- [71] 肖灵香, 方晰, 项文化, 李毅, 李胜蓝. 湘中丘陵区 4 种森林类型土壤理化性质. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(5): 90-97, 108-108.