

DOI: 10.20103/j.stxb.202209292778

高钰, 索奥丽, 高敏, 王忆文, 陈锋, 刘晓东. 不同火烈度对四川泸山林场云南松林土壤有机碳组分的影响. 生态学报, 2023, 43(22): 9281-9293.

Gao Y, Suo A L, Gao M, Wang Y W, Chen F, Liu X D. Effects of different fire severities on soil organic carbon components of *Pinus yunnanensis* forest in Lushan Forest Farm, Sichuan Province. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9281-9293.

不同火烈度对四川泸山林场云南松林土壤有机碳组分的影响

高 钰^{1,2}, 索奥丽¹, 高 敏¹, 王忆文¹, 陈 锋^{1,2}, 刘晓东^{1,2,*}

1 森林草原火灾风险防控应急管理部重点实验室, 北京 100083

2 北京林业大学森林资源生态系统过程北京市重点实验室, 北京 100083

摘要: 林火通过改变土壤理化性质显著影响土壤固碳能力及土壤有机碳各组分含量。阐明不同火烈度对云南松林土壤有机碳的影响, 对于云南松林火后生态系统恢复及土壤碳库管理具有重要意义。以火烧 2 年后四川泸山林场云南松林 0—5、5—10、10—15、15—20 cm 层土壤为研究对象, 根据不同火烈度(未过火、低烈度、中烈度、高烈度)设置 3 块 20 m × 30 m 样地, 共 12 块样地, 野外采集土壤样品, 室内测定土壤全氮、容重等理化性质和土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)、土壤活性有机碳(易氧化有机碳, Readily oxidizable carbon, ROC; 颗粒有机碳, Particulate organic carbon, POC; 微生物生物量碳, Microbial biomass carbon, MBC; 水溶性有机碳, Water-soluble organic carbon, WSOC), 采用方差分析研究不同火烈度下土壤有机碳各组分含量的差异性和变化趋势, 并采用相关性分析和冗余分析从土壤理化性质角度探究林火对土壤有机碳的影响机制。研究结果表明: (1) 不同火烈度显著影响土壤理化性质, 其中土壤全氮、有效磷、阳离子交换量、毛管孔隙度、总孔隙度随火烈度增大而增加, 而土壤 pH、速效钾、碱解氮、容重随火烈度增大而减少。(2) SOC 随火烈度增大而减少, 其中 5—10 cm 土层降幅最大为 44.79%; 4 种土壤活性有机碳随火烈度增大而减小, 其中 0—5 cm 土层下降幅度最明显, 各组分降幅大小依次为 ROC (36.31%—61.31%) > POC (30.05%—53.61%) > MBC (20.60%—48.19%) > WSOC (13.47%—29.29%), 不同组分对林火的不同响应显著影响了土壤 ROC、POC、WSOC 的占比。(3) 土壤有机碳及其活性组分与阳离子交换量、毛管孔隙度、总孔隙度、有效磷、碱解氮呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与容重呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。火烧后土壤有机碳的变化主要与阳离子交换量、容重、全氮、含水率有关, 且阳离子交换量影响最大(解释率为 61.7%)。

关键词: 火烈度; 云南松; 土壤有机碳; 活性有机碳; 土壤理化性质

Effects of different fire severities on soil organic carbon components of *Pinus yunnanensis* forest in Lushan Forest Farm, Sichuan Province

GAO Yu^{1,2}, SUO Aoli¹, GAO Min¹, WANG Yiwen¹, CHEN Feng^{1,2}, LIU Xiaodong^{1,2,*}

1 Key Laboratory of Forest and Grassland Fire Risk Prevention Ministry of Emergency Management, Beijing 100083, China

2 Beijing Key Laboratory for Forest Resources and Ecosystem Processes, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Forest fire significantly affects soil carbon sequestration capacity and components of soil organic carbon content by changing soil physicochemical properties. Explaining the effects of different fire severities on soil organic carbon of *Pinus yunnanensis* forest is of great significance for ecosystem restoration and soil carbon pool management of *Pinus yunnanensis* forest after fire. In this study, the soils of *Pinus yunnanensis* after 2 years fire in different soil layers (0—5, 5—10, 10—15, and 15—20 cm) in Lushan Forest Farm, Sichuan Province were taken as the research object. According to different

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC1511601)

收稿日期: 2022-09-29; 网络出版日期: 2023-10-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xd_liu@bjfu.edu.cn

fire severities (unburned, low severity, moderate severity, height severity), three 20m×30m sample plots were set, and a total of 12 plots were set. Collecting soil samples from the field, soil total nitrogen, soil bulk density and other physicochemical properties as well as soil organic carbon (SOC), soil labile organic carbon (readily oxidizable carbon (ROC), particulate organic carbon (POC), microbial biomass carbon (MBC), and water-soluble organic carbon (WSOC)) were measured. Variance analysis was used to analyze the differences and trends in change of soil organic carbon components under different fire severities. Correlation analysis and redundancy analysis was used to explore the effect mechanism of forest fire on soil organic carbon from the point of view of soil physicochemical properties. The results showed that: (1) different fire severities significantly affected soil physicochemical properties, in which soil total nitrogen, available phosphorus, cation exchange capacity, capillary porosity, and total porosity increased with the increase of fire severity, while soil pH, available potassium, available nitrogen, and bulk density decreased with the increase of fire severity. (2) The SOC decreased with the increasing of fire severity, and the maximum decrease of 5—10 cm soil layer was 44.79%. With the increase of fire severity, the labile organic carbon of four kinds of soil decreased, which the decrease in 0—5 cm soil layer was the most obvious. Among them, the order of decrease of each component was ROC (36.31%—61.31%)>POC (30.05%—53.61%)>MBC (20.60%—8.19%)>WSOC (13.47%—29.29%). The different responses of different components to forest fire significantly affected the proportion of soil ROC, POC, and WSOC. (3) Soil organic carbon and its active components were significantly positively correlated with cation exchange capacity, capillary porosity, total porosity, available phosphorus, and available nitrogen ($P<0.05$), but significantly negatively correlated with bulk density ($P<0.01$). The variations of cation exchange capacity, bulk density, total nitrogen and water content after fire dominated soil organic carbon. Among them, cation exchange capacity had the greatest effect (61.7% explanation).

Key Words: fire severity; *Pinus yunnanensis*; soil organic carbon; labile organic carbon; soil physicochemical property

森林土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)作为森林生态系统的重要组成部分^[1],其碳储量约占森林生态系统碳库的 70%,对植物生长、碳平衡及全球气候变化产生重要影响^[2]。土壤有机碳依据周转和分解速度的差异,可分为惰性、慢性和活性土壤有机碳,其中土壤活性有机碳(Labile organic carbon, LOC)是土壤碳库中易被氧化分解且活性较高的部分,常用易氧化有机碳(Readily oxidizable carbon, ROC)、颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC)、微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)以及水溶性有机碳(Water-soluble organic carbon, WSOC)等表征^[3-4]。土壤活性有机碳直接参与土壤生物化学转化过程,为微生物活动提供能量和养分,是土壤碳库变化的早期敏感性指标,对土壤退化具有指示作用^[5]。因此,研究土壤活性有机碳的变化对维持土壤碳库平衡和促进森林生态系统的养分循环具有重要意义^[6]。

林火作为非连续的自然干扰因子,显著改变了森林生态系统的结构、功能及养分循环等^[7]。近年来,不同火烈度对土壤有机碳影响的研究受到广泛关注,国内外学者基于土壤有机碳含量、密度、组分等方面,对东北地区兴安落叶松林(*Larix gmelinii*)、广东地区马尾松林(*Pinus massoniana*)和欧洲伊比利亚半岛海岸松(*Pinus pinaster*)等林分类型进行了大量研究^[8-10]。研究发现,海岸松林 0—3cm 土壤有机碳含量在高烈度火烧 1 年后下降了 6.61%,在低烈度火烧 1 年后增加了 4.68%^[9];马尾松林 0—20cm 土壤有机碳密度在火烧 2 年后随火烈度的增加而减少,下降幅度依次为 13.91%、28.01%、36.63%^[10];兴安落叶松林 0—15cm 土壤微生物生物量碳含量在高烈度火烧 3 年后增加了 38.58%^[8]。由此可见,受火烈度、地形、气候条件、土壤类型、植被类型等多种因素的影响,短期内土壤有机碳对不同火烈度呈现不同结果^[11-13]。云南松(*Pinus yunnanensis*)作为西南林区主要树种,针叶富含油脂极易引发树冠火,对森林生态系统造成严重破坏^[14-15]。对于该林分类型,仅部分学者对计划火烧后的土壤微生物及酶活性进行了研究^[16],关于不同火烈度对西南地区云南松林土壤有机碳的影响缺乏研究,尤其是林火对云南松林土壤有机碳的影响机制尚未清楚。因此,不同火烈度对云南松林土壤有机碳的影响及其影响机制亟需研究。

四川省作为我国森林火灾的高危区,2019、2020 年连续 2 年发生重大森林火灾,云南松林(*Pinus yunnanensis*)作为该区主要林分类型受损严重^[17]。为此,本研究以四川泸山林场 2020 年云南松林火烧迹地为研究对象,基于野外调查和室内实验分析,立足于解决以下关键科学问题:(1)不同火烈度对四川泸山林场土壤有机碳及其组分是否有影响?(2)林火对云南松林土壤有机碳及其组分的影响机制是什么?研究结果可以为四川泸山林场火后云南松林生态系统恢复和土壤碳库管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于泸山林场(101°46′—102°25′E,27°32′—28°10′N),隶属于四川省西昌市,平均海拔在 1500m 以上,土壤以山地红壤为主。属于亚热带高原季风气候区,年日照时数 2425.8h,年平均气温为 17℃,1 月平均气温 9.4℃,7 月平均气温 22.6℃,全年平均降雨量 1013.1mm,年内雨量分配极不均匀,季节性干旱极其突出。研究区以 20 世纪 80 年代飞播的云南松纯林(*Pinus yunnanensis*)为主,灌木树种主要有铁仔(*Myrsine africana*)、羊耳菊(*Duhaldea cappa*),草本植物主要有紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)、翼齿六棱菊(*Laggetera pterodonta*)^[17]。

1.2 火烈度特征及判别标准

2020 年 3 月 30 日,泸山由于电力故障引发森林火灾,过火面积超过 3000hm²^[17]。本文选择 Landsat8 OLI_TIRS 多光谱卫星遥感影像作为火烈度评估数据源。通过 ENVI5.3,Exelis VIS,USA 和 ArcGIS10.8,ESRI,USA 软件,对火烧前 2019 年 5 月 14 日的遥感影像(条带号为 130,空间分辨率为 30m)和火烧后 2020 年 12 月 26 日的遥感影像(条带号为 130,空间分辨率为 30m)进行辐射定标和大气校正等处理。基于近红外波段(band4)和短红外波段(band7)计算得到的差值归一化火烧指数(difference Normalized Burn Ratio, dNBR)^[18],将火烈度分为未过火、低烈度、中烈度和高烈度 4 个等级,在每个火烈度等级中选择 30 个样本点,统计其 dNBR 值。基于统计结果,利用 dNBR 固定阈值法规则对分级结果进行改正,初步划分了 4 个火烈度等级^[19—20]。在此基础上,开展实地野外调查,在调查过程中,依据树冠烧焦程度和树木死亡率确定火烧迹地的火烈度等级。具体划分标准见表 1^[21—23]。

表 1 火烈度划分标准

Table 1 Criteria for the classification of fire severity level

火烈度 Fire severity	差值归一化火烧指数 dNBR index	树冠烧焦程度 Tree canopy scorch/%	树木死亡率 Tree mortality/%
未过火 Unburned (UB)	dNBR<0.1	—	—
低烈度 Low severity (L)	0.1<dNBR<0.3	树冠烧焦程度<25%	树木死亡率<30%
中烈度 Moderate severity (M)	0.3<dNBR<0.7	25%<树冠烧焦程度<99%	30%<树木死亡率<70%
高烈度 High severity (H)	dNBR>0.7	树冠烧焦程度>99%	树木死亡率>70%

dNBR: Difference normalized burn ratio

1.3 样地设置

于 2021 年 12 月,对火烧 2 年后的泸山林场云南松纯林开展野外调查,设置低烈度、中烈度、高烈度 3 种不同火烈度的样地以及相邻未过火样地(图 1),每个烈度各设置 3 个 20m×30m 的重复样地,共 12 块样地,具体位置见图 2。为保证准确性,选取海拔、坡度、坡向等林分特征较为一致的样地,样地基本概况见表 2。

1.4 土壤样品采集

调查区域土壤为山地红壤,多石砾和母岩露头。在每个样地内按对角线设置 5 个取样点,去除地表覆盖物后,采用四分法对 0—5cm、5—10cm、10—15cm、15—20cm 共 4 层土壤分别混合采样,清除碎石、根系等杂物后过 2mm 筛,分成 2 份,一份立即置于 4℃ 保温箱中保存,用于测定土壤微生物生物量碳和可溶性有机碳;另一份自然风干,室温下保存,用于测定土壤化学性质、颗粒有机碳、易氧化有机碳。此外,用 100cm³ 环刀和铝

盒在每个取样点分层取原状土测定土壤物理性质^[24]。



图 1 不同火烈度干扰后云南松林样地示意图

Fig.1 Zoning map of *Pinus yunnanensis* forest sample plots disturbed by different fire severities

表 2 样地基本情况

Table 2 Basic characteristics of the sampling plots

火烈度 Fire severity	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡位 Position	坡向 Aspect	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	林分密度 Stand density/ (tree/hm ²)	树木 死亡率 Tree mortality/%	树冠烧 焦程度 Tree canopy scorch/%
UB	1610	25.67	中上坡	东北	17.65±1.56	12.80±1.09	1423	0.00	0.00
L	1590	25.33	中坡	东北	20.28±1.52	13.34±1.17	1234	16.27	15.00
M	1600	25.67	中坡	东北	16.53±1.38	12.29±1.38	1014	61.59	45.00
H	1660	25.67	中坡	东北	20.97±0.87	13.18±1.03	633	92.88	100.00

DBH:胸径 Diameter at breast height

现有研究发现林火大多只影响 0—20cm 表层土壤,有的甚至仅影响 0—3cm 土层土壤,对于 20cm 以上的土层几乎没有影响^[9—10]。因此,综合考虑实验时间和成本,本研究考虑不同火烈度对 0—5、5—10、10—15、15—20cm 土层土壤有机碳的影响。

1.5 实验室分析

1.5.1 土壤理化性质测定

土壤含水率(Soil water content,SWC)采用 105℃烘干法测定;土壤容重(Bulk density,BD)用环刀法测定;土壤总孔隙度(Total porosity,TP)、毛管孔隙度(Capillary porosity,CP)利用环刀法和浸水法测定。土壤 pH 值用离子水(水土=2.5:1)浸提后,利用玻璃电极 DP/Starter300 测定;土壤全氮(Total nitrogen,TN)含量采用 Elementar rapid MICRO N cube 定氮仪测定;土壤有效磷(Available phosphorus,AP)含量采用 AA3 连续流动分

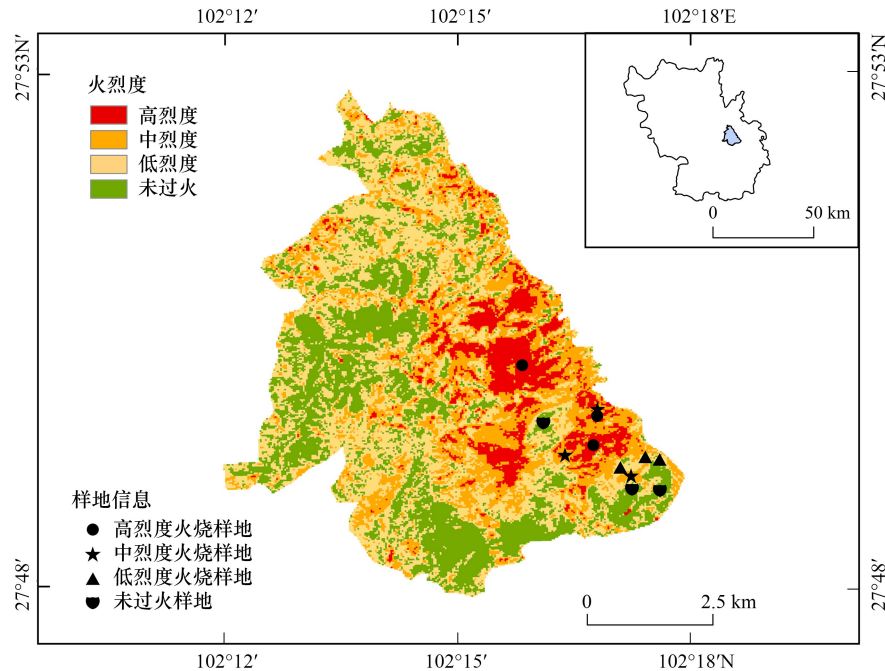


图2 研究区火烈度及样地分布示意图

Fig.2 Zoning map of fire severity and sample plot location in the study

析仪测定;土壤速效钾(Available potassium, AK)含量采用醋酸铵-火焰光度计法测定;土壤碱解氮(Available nitrogen, AN)含量采用火焰原子吸收法测定。土壤阳离子交换量(Cation exchange capacity, CEC)经乙二胺四乙酸和乙酸铵交换后,用凯式定氮仪测定;土壤电导率(Electrical conductivity, EC)采用 TDR350 测定^[25]。

1.5.2 土壤有机碳及活性组分测定

土壤有机碳(SOC)含量采用元素分析仪 Analyzer Vario ELIV 测定;土壤易氧化有机碳(ROC)采用高锰酸钾(0.333mol/L)氧化法测定;土壤颗粒有机碳(POC)采用 0.5mol/L 六偏磷酸钠提取法,利用元素分析仪测定;水溶性有机碳(WSOC)用去离子水(水:土=1:5)浸提后经滤膜(0.45 μ m)过滤,滤液再用总有机碳分析仪 TOC-VC/PH/CPN Analyzer 测定;土壤微生物生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸-K₂SO₄(土:0.5mol/LK₂SO₄溶液=1:4)浸提法,浸提液中的有机碳采用 Multi N/C 3100 TOC 分析仪测定,转换系数取 0.45^[3]。

1.6 数据处理

采用单因素方差分析法(One-Way ANOVA)、多重比较法(Least significant difference, LSD)分析不同火烈度对土壤理化性质以及土壤有机碳及其活性组分含量的影响,显著水平为 $\alpha=0.05$ 。采用 Pearson 相关系数研究土壤有机碳及其活性组分与土壤理化性质的相关性。通过对土壤理化性质因子进行共线性检验,剔除具有较高变异膨胀系数(VIF>10)的因子,采用 RDA 分析研究土壤理化性质对土壤有机碳及其活性组分的影响及解释贡献率。数据处理采用 SPSS 26.0, IBM, USA 和 Canoco 5.0, Microcomputer Power, USA 软件,作图采用 Origin Pro 2021, OriginLab, USA 软件。表中所有数据均为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同火烈度对土壤理化性质的影响

基于典型样地取样调查和室内实验分析结果,利用方差分析研究不同火烈度对四川云南松林土壤物理性质影响的差异性,结果见表 3。

表 3 不同火烈度对土壤物理性质的影响

Table 3 Effects of different fire severities on soil physical properties

火烈度 Fire severity	土层深度 Soil depth/cm	容重 BD/(g/cm ³)	含水率 SWC/%	毛管孔隙度 Capillary porosity/%	土壤总孔隙度 Total porosity/%
UB	0—5	1.16±0.05Bc	9.56±0.11Aa	48.29±1.31Aa	51.79±1.43Aa
	5—10	1.34±0.06Cb	9.67±0.22Aa	44.10±1.14Ab	47.03±0.42Ab
	10—15	1.44±0.03Ca	8.61±0.47Aa	37.96±1.88Ac	41.01±1.91Ac
	15—20	1.49±0.04Ca	8.24±0.17Aa	38.56±1.95Ac	42.00±2.03Ac
L	0—5	1.23±0.17Bc	8.79±0.06Ba	46.77±1.69Aa	50.70±2.38Aa
	5—10	1.34±0.09Cbc	8.35±0.2Ba	40.53±1.77Bb	43.43±2.18Bb
	10—15	1.51±0.06BCab	8.68±0.14Aa	37.96±1.63Ab	40.24±1.53Ab
	15—20	1.63±0.07Ba	7.67±0.51Aa	37.79±1.51Ab	39.80±1.42ABb
M	0—5	1.51±0.03Aa	8.47±0.17Ca	44.63±3.13Aa	48.17±3.05Aa
	5—10	1.55±0.04Ba	6.84±0.23Cb	38.64±1.06Bb	41.64±0.86Bb
	10—15	1.63±0.12ABa	6.64±0.53Bb	35.92±0.45Ab	38.02±0.5Ac
	15—20	1.71±0.09Ba	6.78±0.13Ab	35.74±1.53Ab	37.47±1.12Bc
H	0—5	1.66±0.03Ab	8.44±0.17Ca	40.63±1.63Ba	43.03±1.38Ba
	5—10	1.69±0.04Ab	7.12±0.05Cb	35.10±1.55Cb	37.14±1.24Cb
	10—15	1.74±0.03Ab	7.32±0.25Bb	32.78±0.63Bbc	34.65±0.59Bc
	15—20	1.91±0.06Aa	5.60±0.3Ac	31.13±1.63Bc	33.10±1.77Cc

BD:容重 Bulk density;SWC:土壤含水率 Soil water content;不同大写字母表示相同土层深度不同火烈度差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示相同火烈度不同土层深度间差异显著($P<0.05$)

由表 3 可知,不同火烈度对土壤物理性质有显著影响($P<0.05$)。在 0—20cm 土层中,土壤容重随火烈度的增加而增加,同一火烈度下随土层深度的增加而增加。不同火烈度对土壤含水率的影响在不同土层中表现不同,在 0—5cm 和 15—20cm 土层中,不同火烈度对土壤含水率影响表现为 UB>L>M>H,而在 5—10cm、10—15cm 土层则为中烈度时土壤含水率最小,中烈度、高烈度下随土层深度的增加而减少。土壤毛管孔隙度、总孔隙度在 4 个土层中均呈现 UB>L>M>H 的变化规律,与土壤容重相反,同一火烈度下随土层深度的增加而减少。土壤物理性质各指标的变异系数均在 10%—20%,属于中等变异,变异程度由大到小依次为:土壤含水量>土壤容重>土壤总孔隙度>土壤毛管孔隙度。

基于典型样地取样调查和室内实验分析结果,利用方差分析研究不同火烈度对四川云南松林土壤化学性质影响的差异性,结果见表 4。

表 4 不同火烈度对土壤化学性质的影响

Table 4 Effects of different fire severities on soil chemical properties

火烈度 Fire severity	土层深度 SD/cm	pH	全氮 TN/(g/kg)	有效磷 AP/(mg/kg)	速效钾 AK/(mg/kg)	碱解氮 AN/(mg/kg)	阳离子交换量 CEC/(cmol/kg)	电导率 EC/(μS/cm)
UB	0—5	5.46±0.02Aa	0.48±0.02Ca	1.56±0.28Cc	79.41±2.76Ba	65.08±6.71Ba	17.98±0.87Aa	30.33±2.52Ba
	5—10	5.43±0.03Ba	0.27±0.02Ab	4.67±0.41Aa	66.77±5.08Cb	60.14±1.98Ca	17.37±1.15Aa	32.67±2.52Aa
	10—15	5.31±0.09Ca	0.30±0.01Bb	2.23±0.09Ab	61.13±7.76Cb	46.81±4.62Cb	13.19±0.47Ab	31.67±2.08Aa
	15—20	5.35±0.04Ba	0.21±0.02Ac	1.75±0.26ABbc	61.96±2.13Ab	35.74±7.40Cc	12.91±0.68Ab	35.67±1.15Aa
L	0—5	5.55±0.03Aa	1.17±0.14Ba	4.53±0.47Aa	178.91±15.67Aa	138.95±33.49Aa	17.79±0.92Aa	38.33±2.52Aa
	5—10	5.39±0.04Bb	0.46±0.05Aa	3.46±0.18Bb	115.73±12.39Ba	128.27±5.89ABa	16.81±1.04ABa	31.33±2.08Ab
	10—15	5.00±0.05Dc	0.30±0.02Ba	1.32±0.21Cd	67.19±5.08Ca	132.27±10.45Aa	12.52±0.18Ab	34.67±3.21Aab
	15—20	5.01±0.08Cc	0.26±0.03Aa	2.18±0.18Bc	61.94±1.20Aa	100.00±6.16Ba	9.15±0.85Bc	33.33±0.58Aab
M	0—5	5.78±0.01Aa	1.00±0.17Ba	1.38±0.11Ca	155.27±20.22Aa	175.74±6.47Aa	16.81±0.69ABa	29.33±3.21Ba
	5—10	5.50±0.03Bb	0.76±0.15Ab	1.36±0.21Ca	99.30±9.47Bb	145.87±13.21Ab	14.31±0.94Bb	30.00±4.36Aa
	10—15	5.50±0.05Bb	0.74±0.09Ab	1.82±0.21Ba	78.14±3.50Bbc	123.87±13.08Ac	9.60±0.66Bc	31.67±2.52Aa
	15—20	5.31±0.05Bc	0.96±0.28Ab	1.43±0.29BCa	64.81±3.81Ac	72.53±12.43Bd	9.22±0.61Bc	31.67±3.21Aa
H	0—5	6.06±0.17Aa	1.63±0.17Aa	2.57±0.29Ba	177.35±14.28Aa	162.28±16.88Aa	15.34±1.18Ba	35.00±3.61ABa
	5—10	5.72±0.10Ab	1.28±0.30Ab	1.36±0.21Cb	143.90±12.61Ab	122.28±13.09Bb	14.08±1.56Ba	36.00±5.20Aa
	10—15	5.68±0.05Ab	0.87±0.12Ac	1.57±0.17BCb	121.48±4.78Ac	83.21±12.42Bc	13.94±1.70Aa	31.00±4.36Aa
	15—20	5.85±0.07Ab	0.64±0.04Ac	1.08±0.19Cb	106.59±11.57Ac	60.14±8.54Ac	9.34±0.23Bb	30.67±5.51Aa

SD: 土层深度 Soil depth; TN:全氮 Total nitrogen; AP:有效磷 Available phosphorus; AK:速效钾 Available potassium; AN:碱解氮 Available nitrogen; CEC:阳离子交换量 Cation exchange capacity; EC:电导率 Electrical conductivity;不同大写字母表示相同土层深度不同火烈度差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示相同火烈度不同土层深度间差异显著($P<0.05$)

由表 4 可知,除电导率外,不同火烈度对土壤化学性质影响显著 ($P<0.01$)。高烈度土壤 pH 显著高于中烈度、低烈度、未过火,同一火烈度下随土层深度的增加而减少。土壤全氮含量随火烈度增加而减少,低烈度、高烈度下随土层深度的增加而减少。除 5—10cm 外,未过火土壤有效磷含量显著大于低烈度、中烈度、高烈度,同一火烈度对不同土层的差异不显著。在 5—20cm 各层中,土壤速效钾含量高烈度显著高于低烈度和中烈度,同一火烈度下随土层深度的增加而减少。与对照样地相比,火干扰后土壤碱解氮含量显著增加,同一火烈度下随土层深度的变化规律与土壤速效钾相一致。除 10—15cm 外,火干扰后土壤阳离子交换量呈现 $UB>L>M>H$ 规律,同一火烈度下随土层深度的增加而减少。土壤电导率介于 29.33—38.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间,火烧前后仅在 0—5cm 下存在显著差异;仅低烈度对 0—5、5—10、10—15、15—20cm 不同土层影响差异显著。pH 变异系数为 5.11%,属于低变异;而其他各指标的变异系数均在 10%—70%,属于中等变异,变异程度由大到小依次为:全氮>有效磷>碱解氮>速效钾>阳离子交换量>电导率。

2.2 不同火烈度对土壤有机碳及其活性组分的影响

利用方差分析方法,对不同火烈度不同土层深度下四川云南松林土壤有机碳及其活性组分含量 (SOC、LOC、ROC、MBC、POC、WSOC) 进行研究,结果见图 3。

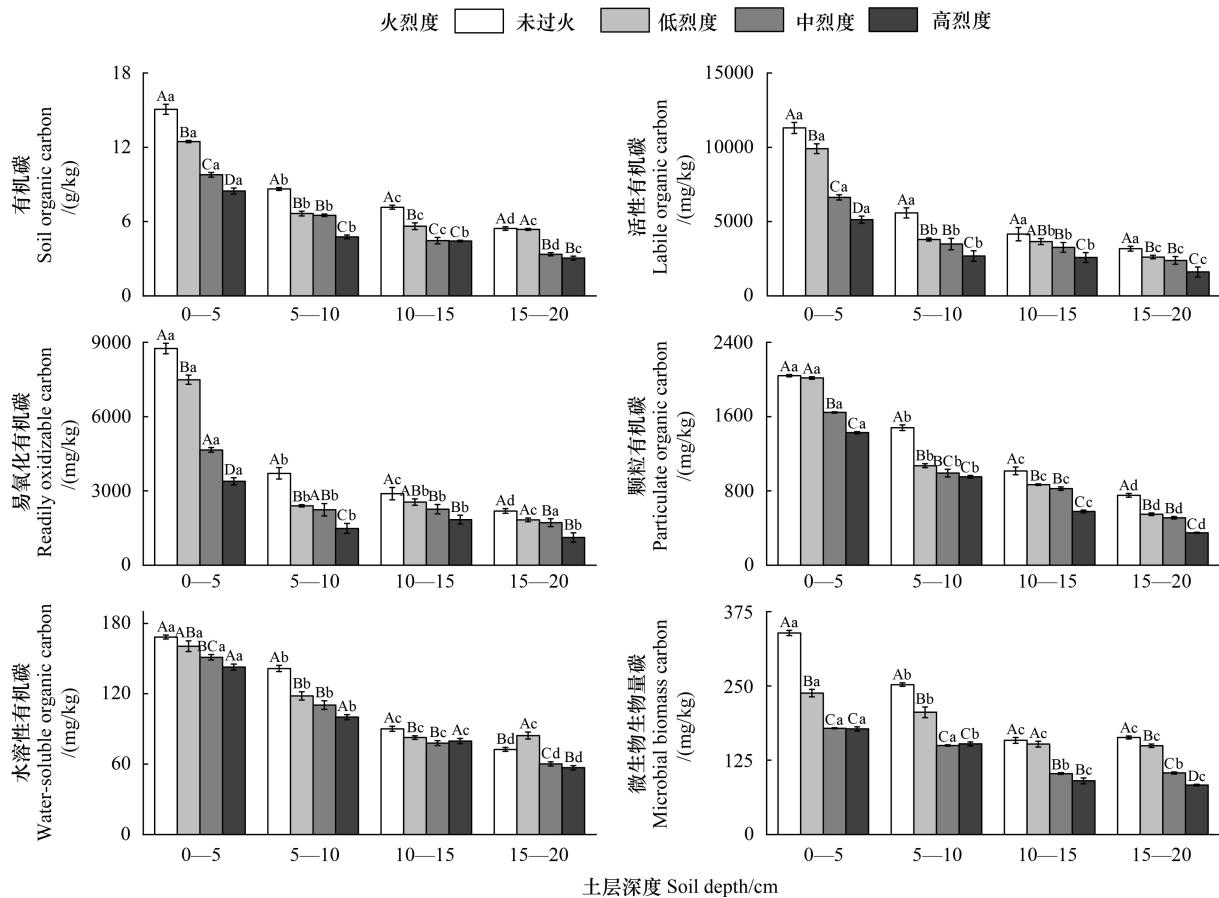


图 3 不同火烈度对土壤有机碳及活性组分的影响

Fig.3 Effects of different fire severities on soil organic carbon and its labile organic carbon components

不同大写字母表示相同土层深度不同火烈度差异显著 ($P<0.05$);不同小写字母表示相同火烈度不同土层深度间差异显著 ($P<0.05$)

由图 3 可知,不同火烈度对土壤有机碳及其活性组分影响显著 ($P<0.01$)。土壤 SOC 介于 3.05—15.06 g/kg 之间,随火烈度增大而减小,同一火烈度下随土层深度增加而降低。不同火烈度土壤 SOC 的变异系数由大到小依次为 $UB(19.79\%)>M(44.86\%)>L(44.86\%)>H(48.73\%)$,结果表明高烈度对 SOC 影响更显著。

土壤 LOC 介于 1240.78—11518.82mg/kg 之间,随火烈度增大而减小,同一火烈度下随土层深度增加而降低 ($P<0.05$)。土壤 MBC、POC、ROC 含量分别为 80.24—338.98mg/kg、349.40—2040.88mg/kg、1111.72—8753.18mg/kg,均随火烈度增加而减少,同一火烈度下随土层深度增加而降低。WSOC 含量介于 56.95—168.33mg/kg 之间,其含量在 0—5、5—10 和 10—15cm 土层中随火烈度增加显著降低,在 15—20cm 土层中,极大值出现于 L。土壤活性有机碳各组分降幅排序为 ROC (36.31%—61.31%)>POC (30.05%—53.61%)>MBC (20.60%—48.19%)>WSOC (13.47%—29.29%)。土壤活性有机碳组分的变异系数在 33.93%—66.88% 之间,属于中等变异,变异程度由大到小依次为:ROC>POC>MBC>WSOC。此外,不同火烈度下土壤 ROC 变异程度从大到小依次为 L>UB>H>M,表明低烈度对土壤 ROC 影响最显著。

2.3 不同火烈度对土壤有机碳各组分占比的影响

分析不同火烈度对土壤有机碳各组分占土壤有机碳的比例的影响 (NLOC/SOC、ROC/SOC、MBC/SOC、POC/SOC、WSOC/SOC),结果见图 4。

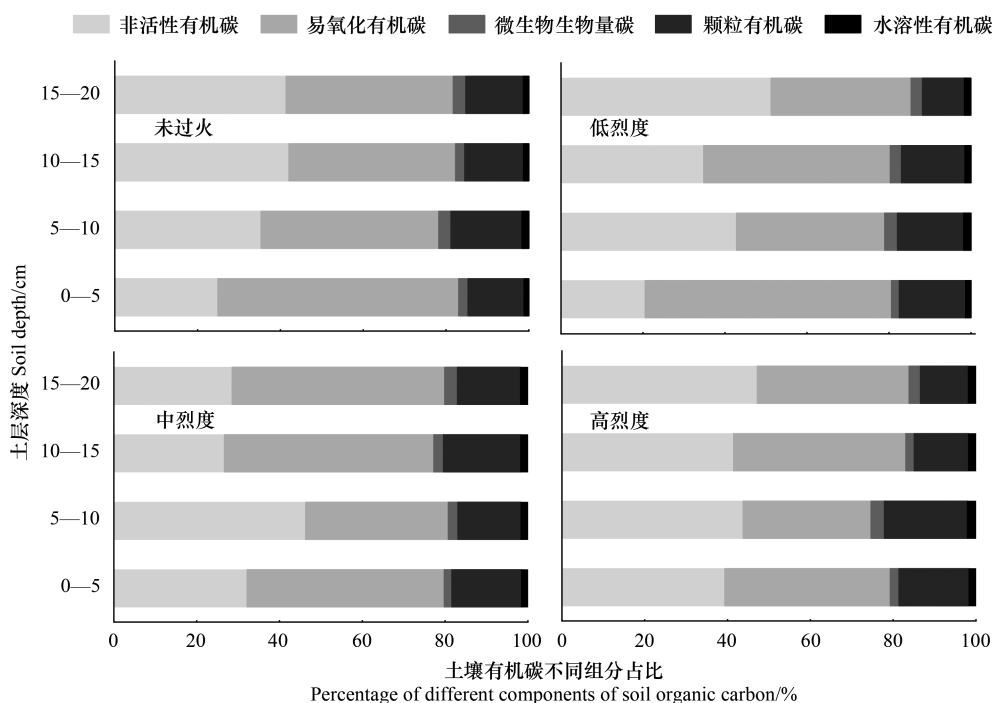


图 4 不同火烈度对土壤有机碳活性组分占比的影响

Fig.4 Effect of different fire severities on percentage of labile organic carbon components

由图 4 可知,土壤 ROC 占 SOC 的比例最大,为 34.14%—60.08%,在 10—20cm 土层中,中烈度可增加土壤 ROC 分配比例。土壤 WSOC 占 SOC 的比例最小,为 1.12%—2.10%,林火提高了其在土壤 SOC 中的比重。土壤 POC 的分配比例为 10.22%—20.01%,火烧后所占比例有所提高。土壤 MBC 分配比列为 1.83%—3.09%,不同火烈度下,土壤 MBC 占比无明显变化趋势,且相互之间差异不显著。土壤非活性土壤有机碳分配比例为 24.90%—51.27%,火烧后各层土壤非活性有机碳占比明显增加。

2.4 火烧后土壤理化性质与土壤有机碳及活性组分的关系

应用 Person 相关性分析可有效表征云南松林土壤有机碳及其活性组分与土壤理化性质的关系,相关性分析结果见图 5。

由图 5 可知,CEC、CP、TP、AP 与土壤有机碳及活性组分呈显著正相关 ($P<0.05$),BD 与土壤有机碳及活性组分呈极显著负相关 ($P<0.01$);土壤有机碳及活性组分之间呈极显著正相关。除此之外,WSOC、POC 还与 AN、AK、SWC、pH、TN 成呈显著正相关 ($P<0.05$)。

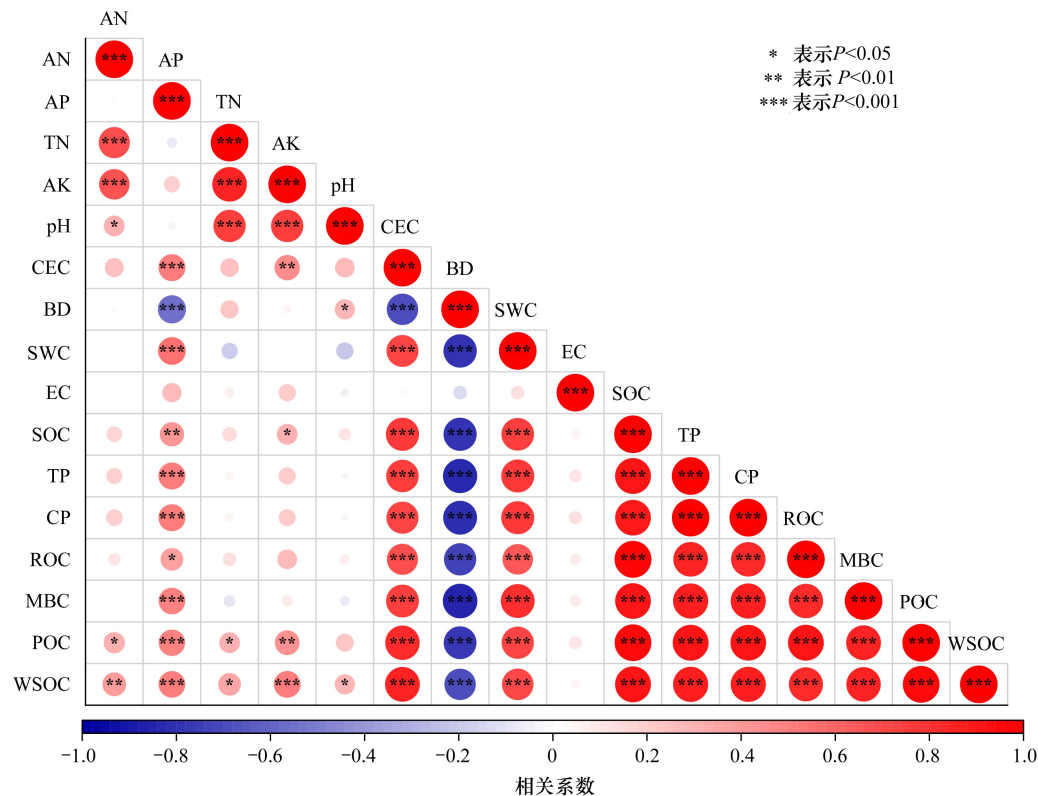


图5 土壤有机碳及活性组分与土壤理化性质的相关关系

Fig.5 Correlation of soil organic carbon and labile organic carbon components with soil physicochemical properties
TN:全氮;AP:有效磷;AK:速效钾;AN:碱解氮;CEC:阳离子交换量;EC:电导率;BD:容重;SWC:土壤含水率;SOC:有机碳;TP:总孔隙度;CP:毛管孔隙度;ROC:易氧化有机碳;MBC:微生物生物量碳;POC:颗粒有机碳;WSOC:水溶性有机碳

利用冗余分析研究林火对云南松林土壤有机碳及其活性组分的影响机制,结果见图6。研究结果表明,RDA1和RDA2分别解释了0—20cm土壤有机碳及其活性组分的95.14%和3.49%,总体解释率为99.97% ($P=0.002$)。此外,9种土壤理化性质对土壤有机碳及其活性组分影响存在一定差异,经Monte Carlo置换检验,发现CEC是影响火后云南松林土壤有机碳及其活性组分的关键因子,解释率为61.7% ($P=0.002$)。此外,BD、TN、SWC对土壤有机碳组分的影响达到显著水平 ($P<0.05$),解释率分别为10.5%、5.0%、2.2%。

3 讨论

3.1 不同火烈度对土壤理化性质的影响

林火通过烧毁森林植被和凋落物来改变土壤理化性质,进而影响生物地球化学循环^[26]。目前关于不同火烈度对土壤理化性质的短期影响研究主要集中在土壤容重、含水率、pH、养分元素方面,其影响程度对不同林分类型表现出一定差异^[27—29]。本研究发现,云南松林土壤容重随火烈度的增加显著升高,这主要是由于火烈度等级越高,火烧后土壤空隙堵塞与土壤团粒结构遭破坏越严重^[30—31]。云南松林土壤含水率火烧后显著下降,这可能是由于火烧后水分下渗受阻,土壤持水能力下降,导致土壤侵蚀和流失加剧^[32],此外,由于热量传递差异,使同一火烈度对不同土层土壤含水率影响存在差异。高烈度云南松林土壤pH值显著高于中烈度、低烈度、未过火,一方面可能是是因为高烈度火烧后阳离子交换总量以及利用率增加,另一方面可能是高烈度火烧后可溶性碱性金属氧化物形成碳酸盐,其能够中和土壤酸性^[27,33]。火烧对云南松林土壤有效钾和碱解氮有促进作用,有效钾含量增加可归因于火后灰分的增加^[28],而碱解氮含量增加则归结于火后固氮植被增多及土壤无机物堆积等^[29]。云南松林土壤全氮、有效磷含量随火烈度增加而减少,可能分别与火场温度过

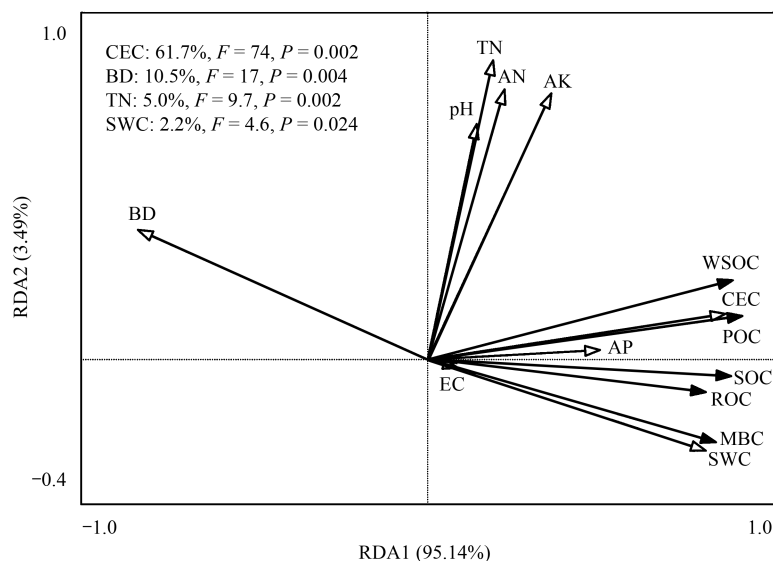


图6 火烧后土壤理化性质对土壤有机碳及其活性组分影响的冗余分析

Fig.6 Redundancy analysis of the effects of soil physical and chemical properties on soil organic carbon and its labile organic carbon components

高(800—1000℃)刺激了氮的淋失与挥发^[9]、可溶性磷的迁移受到限制有关^[34]。

除上述指标外,土壤阳离子交换量、土壤总孔隙度直接影响土壤通气透水性、土壤供肥和保肥能及肥力的发挥,决定土壤养分的生物有效性,是反应土壤养分的重要指标影响^[21,34],而目前关于不同火烈度对土壤阳离子交换量和总孔隙度的研究甚少。本研究发现,阳离子交换量随火烈度的增加而减少,这可能是因为火烧抑制了植物根系分泌有机酸和枯落物积累、分解和矿化等过程,导致土壤胶体表面阳离子吸附点位和负电荷密度减少,此外,还可能与非盐基离子量减少有关^[35]。土壤总孔隙度、毛管孔隙度随火烈度增加而减少,这可能是因为火烧后土壤容纳水分和空气能力减弱,导致土壤蓄水保土能力退化^[36]。

3.2 不同火烈度对土壤有机碳及其活性组分的影响

火烧后森林生态系统结构和功能的恢复和更新在很大程度上取决于土壤有机碳含量^[4]。

目前有关不同火烈度对土壤有机碳含量的短期影响具有很大的不确定性,例如,在兴安落叶松林研究发现,土壤有机碳含量随火烈度的增加而增加^[8],而也有研究发现马尾松林土壤有机碳含量随火烈度的增加而减少^[37]。本研究中,云南松林土壤有机碳随火烈度的增加而减少,这可能是因为林火改变碳输入以及土壤有机碳的矿化、转化和分解过程^[38],该研究结果与赵彬等人不同,这可能与气候因素有关,东北地区属于寒温带大陆性季风气候,四川属于亚热带高原季风气候区,两地降水、气温、光照等均有不同,进而使土壤有机碳在火烧2年后就呈现显著差异。此外,同一火烈度下,土壤有机碳含量在不同土层间有明显垂直递减的规律,这可能是由于0—5cm土层碳源多、燃烧时产热高,最易受到火烧的影响。

土壤活性有机碳能灵敏反应土壤有机碳库的微小变化,对火烧后土壤质地及生态系统的退化具有一定指示作用。目前关于火烧对土壤活性有机碳组分的研究众多,张茂增等^[24]和刘俊第等^[11]分别对火烧2年后的樟子松林和火烧1年后的马尾松林0—20cm土壤研究,发现火烧使得ROC、POC、WSOC、MBC含量下降^[11]。在本研究中,划分了4个火烈度等级研究火后1年云南松林0—20cm土壤活性土壤有机碳及土壤各活性有机碳组分占比的变化规律,研究发现云南松林0—5cm土壤ROC、POC、MBC、WSOC含量均随火烈度的增加而减少。与未火烧样地相比,高烈度、中烈度、低烈度土壤ROC含量分别下降了61.31%、46.82%、14.43%,ROC/SOC比例随火烈度的增大而增大,这主要是因为火烧后土壤湿度降低,土壤有机质易转化成为活性较强的ROC,ROC氧化分解速率加快^[39],说明土壤碳库稳定性越差^[31]。与未火烧样地相比,高烈度、中烈度、低烈度

土壤 MBC 含量分别下降了 47.60%、47.27%、29.80%,这可能是是因为根系、菌根的生长受到抑制,表层土壤有机质受热分解^[40-42]。与未火烧样地相比,高烈度、中烈度、低烈度土壤 POC 含量分别下降了 30.05%、19.41%、1.20%,一方面可能是因为植物残体减少致使碳源减少,另一方面可能是因为地表温度升高和碳裸露导致土壤微生物大量繁殖,加快了土壤 POC 分解效率^[43]。与未火烧样地相比,高烈度、中烈度、低烈度土壤 WSOC 含量分别下降了 15.21%、10.24%、4.66%,这可能是由于植物凋落物、根系分泌物以及腐殖化有机质的流失^[12]。

3.3 火烧后土壤有机碳及其活性组分对土壤理化性质的响应

土壤理化性质在森林土壤碳循环过程中扮演着重要角色。关于不同林分密度、氮添加、土地利用方式等外部环境因素对土壤有机碳及活性组分影响机制的研究众多,研究发现土壤有机碳及其活性组分与土壤理化性质关系密切,通过改变土壤容重、全氮、全磷,进而影响微生物群落结构、空间分布及土壤酶活性,在一定程度上促进或抑制土壤有机质分解、炭黑沉降以及土壤呼吸碳释放等过程,从而导致土壤有机碳及活性组分发生变化^[44-47]。

在本研究中,火烧后土壤容重、全氮对土壤有机碳组分的影响达到显著水平($P<0.05$),解释率分别为 10.5%、5.0%。土壤有机碳含量随土壤容重增大而减少,这是因为容重大的土壤通透性、保水保肥性差,植物生长滞缓,不利于土壤有机碳的积累^[48]。火烧后随着土壤全氮含量减少,云南松林土壤有机碳含量也减少,这可能是由于火烧后生物量减少、林冠层间隙加大,植物氮利用率和根系利用效率降低,从而不利于林分植物的生长和土壤有机碳的积累^[49-51]。此外,土壤 pH 也可通过影响土壤氮元素释放、转化过程,间接影响土壤有机碳含量^[51]。在本研究中,CEC、SWC 对土壤有机碳组分的影响也达到显著水平($P<0.05$),解释率分别为 61.7%、2.2%,也是火后四川云南松林土壤有机碳及活性组分变化的主要原因,与此前研究结果不一致。相较于其他外部环境的改变,林火可以直接烧毁森林植被和凋落物,植物根系也有可能破坏,这改变了植物与微生物养分有效性^[49],促进好氧微生物分解土壤有机碳,从而抑制土壤有机碳的积累^[52]。

4 结论

(1) 云南松林土壤阳离子交换量和土壤总孔隙度随火烈度的增加而减少。此外,不同火烈度对云南松林 pH、容重、全氮、有效磷、速效钾、碱解氮的影响也存在显著差异。

(2) 土壤有机碳含量随火烈度增大而减小,在 5—10cm 土层下降幅度最大(44.79%)。土壤易氧化有机碳、颗粒有机碳、微生物生物量碳、水溶性有机碳随火烈度增大而减小,下降幅度在 0—5cm 土层最明显。土壤易氧化有机碳占土壤有机碳的比例最大(34.14%—60.08%),在 10—20cm 土层中,云南松林土壤易氧化有机碳分配比例在中烈度火烧后增加了 26.37%。

(3) 土壤阳离子交换量、容重、全氮、含水率可以解释火后云南松林土壤有机碳及活性组分含量的绝大部分变化。其中,土壤阳离子交换量是影响火后云南松林土壤有机碳及其活性组分变化的关键因子。

林火对土壤有机碳的影响是一个复杂、长期的过程,本研究仅探讨了不同火烈度对云南松林土壤有机碳的短期影响,土壤有机碳及其活性组分对林火的长期响应仍需进一步探究。

参考文献(References):

- [1] 张慧玲, 吴建平, 熊鑫, 褚国伟, 周国逸, 张德强. 南亚热带森林土壤碳库稳定性与碳库管理指数对模拟酸雨的响应. 生态学报, 2018, 38(2): 657-667.
- [2] Waring B G, Sulman B N, Reed S, Smith A P, Averill C, Creamer C A, Cusack D F, Hall S J, Jastrow J D, Jilling A, Kemner K M, Kleber M, Liu X J A, Pett-Ridge J, Schulz M. From pools to flow: the PROMISE framework for new insights on soil carbon cycling in a changing world. Global Change Biology, 2020, 26(12): 6631-6643.
- [3] 宋小艳, 张丹桔, 张健, 李建平, 纪托未, 欧江, 胡相伟. 马尾松(*Pinus massoniana*)人工林林窗对土壤不同形态活性有机碳的影响. 生态学报, 2015, 35(16): 5393-5402.

- [4] Owiti D A, Tazisong I A, Senwo Z N. Microbial and organic matter patterns in a prescribed burned and thinned managed forest ecosystem. *Ecosphere*, 2017, 8(12): e01962.
- [5] 齐梦娟, 石朔蓉, 姜春前, 王书韧, 王辉, 王景弟. 青冈栎次生林土壤活性有机碳对间伐强度的响应. *林业科学研究*, 2021, 34(6): 122-129.
- [6] 王有良, 宋重升, 彭丽鸿, 崔朝伟, 郑鸣鸣, 林开敏, 任正标, 谢汝根, 胡永颜. 间伐对杉木人工林土壤碳氮及其组分特征的影响. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 204-212.
- [7] 孙龙, 孙奥博, 胡同欣. 火干扰对森林生态系统土壤呼吸组分的影响研究进展. *生态学报*, 2021, 41(17): 7073-7083.
- [8] 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.
- [9] Francos M, Úbeda X, Pereira P, Alcañiz M. Long-term impact of wildfire on soils exposed to different fire severities. A case study in Cadiretes Massif (NE Iberian Peninsula). *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 664-671.
- [10] 罗斯生, 罗碧珍, 魏书精, 胡海清, 李小川, 吴泽鹏, 王振师, 周宇飞, 钟映霞. 中度强度森林火灾对马尾松次生林土壤有机碳密度的影响. *植物生态学报*, 2020, 44(10): 1073-1086.
- [11] 刘俊第, 林威, 王玉哲, 姜婧, 方熊, 易志刚. 火烧对马尾松林土壤酶活性和有机碳组分的影响. *生态学报*, 2018, 38(15): 5374-5382.
- [12] 李红运, 辛颖, 赵雨森. 火烧迹地不同恢复方式土壤有机碳分布特征. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2747-2753.
- [13] Kong J J, Yang J, Cai W H. Topography controls post-fire changes in soil properties in a Chinese boreal forest. *Science of the Total Environment*, 2019, 651: 2662-2670.
- [14] 戚书玮, 陈奇伯, 杨波, 杨建光, 黎建强, 黄新会. 计划烧除对云南松林群落结构和物种多样性的影响研究. *河南理工大学学报: 自然科学版*, 2022, 41(4): 80-88.
- [15] 司宏敏. 云南松天然林火发生规律及过火对种群动态的影响[D]. 昆明: 云南大学, 2019.
- [16] 田荣, 陈奇伯, 黎建强, 赵雨田, 杨关吕, 左嫚. 计划烧除对云南松林土壤微生物及酶活性的影响. *生态环境学报*, 2020, 29(4): 695-701.
- [17] 胡卸文, 金涛, 殷万清, 霍柱北, 宋钰朋, 张绍科, 王严, 杨瀛. 西昌市经久乡森林火灾火烧区特点及火后泥石流易发性评价. *工程地质学报*, 2020, 28(4): 762-771.
- [18] 付婧婧, 吴志伟, 闫赛佳, 张宇婧, 顾先丽, 杜林翰. 气候、植被和地形对大兴安岭林火烈度空间格局的影响. *生态学报*, 2020, 40(5): 1672-1682.
- [19] 刘杨扬. 基于 GEE 的林火识别与火后植被恢复评估研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [20] García M J L, Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using thematic Mapper data. *Geocarto International*, 1991, 6(1): 31-37.
- [21] Li Q W, Ahn S, Kim T, Im S. Post-fire impacts of vegetation burning on soil properties and water repellency in a pine forest, South Korea. *Forests*, 2021, 12(6): 708-723.
- [22] Fuentes-Ramirez A, Salas-Eljatib C, González M E, Urrutia-Estrada J, Arroyo-Vargas P, Santibañez P. Initial response of understorey vegetation and tree regeneration to a mixed-severity fire in old-growth *Araucari-Nothofagus* forests. *Applied Vegetation Science*, 2020, 23(2): 210-222.
- [23] Hoy E E, French N H F, Turetsky M R, Trigg S N, Kasischeke E S. Evaluating the potential of Landsat TM/ETM+ imagery for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests. *International Journal of Wildland Fire*, 2008, 17(4): 500-514.
- [24] 张茂增, 辛颖, 赵雨森. 火烧对大兴安岭樟子松天然林土壤有机碳组分的影响. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 322-326.
- [25] 李婷婷, 唐永彬, 周润惠, 余飞燕, 董洪君, 王敏, 郝建峰. 云顶山不同人工林林下植物多样性及其与土壤理化性质的关系. *生态学报*, 2021, 41(3): 1168-1177.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 王丽, 王兆锋, 张镡锂, 土艳丽, 尚二萍. 火烧对拉萨地区湿草甸湿地土壤养分特征的影响. *环境科学研究*, 2013, 26(5): 549-554.
- [29] 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.
- [30] 付鹏程, 胡广录, 巩炜, 李浩然, 周川. 河西走廊沙漠-绿洲过渡带固沙植物根区土壤物理性质及持水特性. *土壤通报*, 2021, 52(4): 811-820.
- [31] James J A, Kern C C, Miesel J R. Legacy effects of prescribed fire season and frequency on soil properties in a *Pinus resinosa* forest in northern Minnesota. *Forest Ecology and Management*, 2018, 415/416: 47-57.
- [32] Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 2005, 143(1): 1-10.
- [33] Lombao A, Barreiro A, Carballas T, Fontúrbel M T, Martín A, Vega J A, Fernández C, Díaz-Raviña M. Changes in soil properties after a wildfire in Fragas do Eume Natural Park (Galicia, NW Spain). *CATENA*, 2015, 135: 409-418.
- [34] Marcos E, Villalón C, Calvo L, Luis-Calabuig E. Short-term effects of experimental burning on soil nutrients in the Cantabrian heathlands.

- Ecological Engineering, 2009, 35(5): 820-828.
- [35] 温军, 王晓丽, 王彦龙. 长江源区 3 种地形高寒草地土壤阳离子交换量和交换性盐基离子的分布特征及其机理探讨. 生态环境学报, 2019, 28(3): 488-497.
- [36] 吴义远, 董文渊, 浦婵, 谢泽轩, 钟欢, 李吉, 张炜. 箬竹构件生物量积累分配特征及其与土壤物理性质的关系. 生态学报, 2022, 42(9): 3516-3524.
- [37] 罗碧珍, 胡海清, 罗斯生, 魏书精, 吴泽鹏, 刘菲. 林火干扰对广东马尾松林土壤有机碳密度及其活性有机碳的影响. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2020, 44(5): 132-140.
- [38] Alcañiz M, Outeiro L, Francos M, Úbeda X. Effects of prescribed fires on soil properties: a review. Science of the Total Environment, 2018, 613/614: 944-957.
- [39] 陆刚, 黄海霞, 周晓雷, 曹雪萍, 赵安. 迭部林区云冷杉林火烧迹地土壤有机碳及酶活性变化特征. 草地学报, 2022, 30(4): 943-949.
- [40] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 魏书精, 吴泽鹏, 王振师, 李小川, 周宇飞. 林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响研究进展. 生态学报, 2020, 40(6): 1839-1850.
- [41] 张瑞, 张贵龙, 姬艳艳, 李刚, 常泓, 杨殿林. 不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响. 环境科学, 2013, 34(1): 277-282.
- [42] Wang Y, Ruan H H, Huang L L, Feng Y Q, Qi Y, Zhou J Z, Shen Y L. Soil labile organic carbon with different land uses in reclaimed land area from Taihu Lake. Soil Science, 2010, 175(12): 624-630.
- [43] 商泽安, 宋涵晴, 舒琪, 胡璇, 漆良华. 海南岛甘什岭低地次生雨林土壤有机碳及影响因素. 生态环境学报, 2021, 30(2): 297-304.
- [44] 刘先, 索沛衡, 杜大俊, 刘雨晖, 胡亚林, 王玉哲. 连栽杉木人工林参与土壤碳氮转化过程酶活性及其与土壤理化因子的相关性. 生态学报, 2020, 40(1): 247-256.
- [45] 戴辉, 周嘉聪, 曾泉鑫, 元晓春, 崔琚琰, 孙雪琦, 苏先楚, 李伟鹏, 陈岳民. 短期氮添加对黄山松林土壤碳组分的影响及其微生物机制. 环境科学学报, 2022, 42(9): 291-300.
- [46] 吴希慧, 王蕊, 高长青, 高胜, 杜兰兰, KHAN Asif, BARMON Milon, 郭胜利. 土地利用驱动的土壤性状变化影响微生物群落结构和功能. 生态学报, 2021, 41(20): 7989-8002.
- [47] Jiménez-Morillo N T, de la Rosa J M, Waggoner D, Almendros G, González-Vila F J, González-Pérez J A. Fire effects in the molecular structure of soil organic matter fractions under *Quercus suber* cover. CATENA, 2016, 145: 266-273.
- [48] 郭月峰, 祁伟, 姚云峰, 刘璐. 小流域梯田土壤有机碳与土壤物理性质的关系研究. 生态环境学报, 2020, 29(4): 748-756.
- [49] Sun Q Q, Meyer W S, Koerber G R, Marschner P. A wildfire event influences ecosystem carbon fluxes but not soil respiration in a semi-arid woodland. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 226/227: 57-66.
- [50] Augusto L, De Schrijver A, Vesterdal L, Smolander A, Prescott C, Ranger J. Influences of evergreen gymnosperm and deciduous angiosperm tree species on the functioning of temperate and boreal forests. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 2015, 90(2): 444-466.
- [51] Caon L, Vallejo V R, Ritsema C J, Geissen V. Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. Earth-Science Reviews, 2014, 139: 47-58.
- [52] 陈忠柳, 舒英格, 周鹏鹏. 喀斯特山区不同生态恢复模式土壤盐基离子的交换及分布特征. 水土保持学报, 2020, 34(4): 304-311, 319.