DOI: 10.5846/stxb201709191685
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): - .
Liu J D, Lin W, Wang Y Z, Jiang J, Fang X, Yi Z G.Effects of fire on soil enzyme activities and organic carbon fractions in *Pinus massoniana* forest.Acta Ecologica Sinica,2018,38(15): - .

火烧对马尾松林土壤酶活性和有机碳组分的影响

刘俊第[1],林 威[1],王玉哲[2],姜 婧[1],方 熊[1,*],易志刚[1]
1 福建农林大学资源与环境学院,福州 350002
2 福建农林大学林学院,福州 350002

摘要:土壤酶参与土壤有机质矿化过程,林火能通过改变土壤中微生物的群落结构等来改变土壤酶的活性,进而影响土壤有机碳的动态过程。土壤有机碳库是陆地碳库的重要组成部分,火烧会使土壤有机碳组分发生变化,研究火烧后土壤有机碳组分的变化对于土壤有机碳库的管理具有重要意义。本研究以我国中亚热带典型马尾松人工林火烧迹地为研究对象,通过对比研究,探讨了火烧对土壤酶活性和土壤有机碳组分的影响以及两者之间的关系。结果表明:(1)与对照相比,火烧后一年 0—10 cm 土层土壤 pH 值明显升高($P<0.05$),土壤总碳含量显著降低($P<0.05$),土壤全氮含量平均降低 17.5%($P>0.05$)。0—10 cm 土层和 10—20 cm 土层土壤含水量均显著低于对照($P<0.05$)。(2)相比对照,土壤 β-葡萄糖苷酶活性在 0—10 cm 土层显著降低($P<0.05$),土壤酚氧化物酶活性和过氧化物酶活性显著升高($P<0.05$)。(3)火烧后一年 0—10 cm 土层土壤微生物量碳、土壤颗粒性有机碳、土壤易氧化碳含量比对照分别降低 26.4%、30.9%和 2.69%,但无显著差异,土壤溶解性有机碳含量则显著降低($P<0.05$);两个土层土壤不稳定有机碳含量和粘粒有机碳含量变化不显著。

关键词:马尾松人工林;火烧;土壤酶活性;土壤总碳;土壤有机碳组分

Effects of fire on soil enzyme activities and organic carbon fractions in *Pinus massoniana* forest

LIU Jundi[1], LIN Wei[1], WANG Yuzhe[2], JIANG Jing[1], FANG Xiong[1,*], Yi Zhigang[1]
1 *School of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou* 350002, *China*
2 *School of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou* 350002, *China*

Abstract: Soil enzymes are involved in the mineralization of soil organic matter (SOM). Forest fire changes soil enzyme activities by changing microbial community structure and thus affects the dynamic processes of soil organic carbon (SOC). The SOC pool is an important component of the terrestrial carbon pool, and forest fire causes changes in SOC fractions. The effects of fire on soil enzyme activities and SOC fractions were assessed using a comparative study on a burned area of typical *Pinus massoniana* plantation in subtropical China. The results showed that: (1) Compared with the control, soil pH at depth of 0—10 cm increased dramatically one year after the fire ($P<0.05$). Conversely, total soil carbon (TC) concentration decreased by 29.1% ($P<0.05$), the average of soil total nitrogen (TN) concentration decreased by 17.5% ($P>0.05$). Soil moisture content at 0—10 cm and 10—20 cm were both significantly lower than that of control ($P<0.05$). (2) Compared with the control, the activity of soil β-glucosidase decreased at depth of 0—10 cm ($P<0.05$); however, soil phenyl oxygenase and peroxidase activities significantly increased ($P<0.05$). (3) One year after the fire, soil microbial biomass carbon, soil particulate organic carbon, and soil readily oxidized carbon concentration at depth of 0—10 cm decreased by 26.4%, 30.9%, and 2.69% ($P>0.05$), respectively, but soil dissolved organic carbon concentration

基金项目:福建省教育厅项目(JAT170169);福建省教育厅项目(JAT170189)
收稿日期:2017-09-19; **网络出版日期**:2018-00-00
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: fangxiong@ fafu.edu.cn

decreased by 19.2% significantly ($P<0.05$). Both layers of soil clay organic carbon concentration tended to decrease ($P>0.05$).

Key Words: *Pinus massoniana* plantation; fire; soil enzyme activities; soil total carbon; soil organic carbon fractions

林火是森林生态系统的重要干扰因素[1],可以在短期内影响土壤的元素循环、养分有效性及土壤微生物活性,进而影响森林生态系统过程[2]。据统计,全球每年约发生火灾 22 万次,焚毁各种森林面积累计达到 640 多万 hm^2,约占世界森林覆盖率为 0.23%[3]。土壤酶主要来源于土壤动物以及微生物的胞外分泌物,植物及其根际分泌物以及土壤中有机残体的分解产物,它可以分解土壤中的有机物质,对土壤中的生物化学反应产生直接和间接的影响[4-6]。土壤酶可以影响土壤质地和土壤肥力,影响包括 C、N、P 等元素的循环,通过酶促作用调控土壤有机质矿化过程,从而提高土壤养分的有效性,对土壤生物地球化学循环过程具有重要作用[7-9]。

火烧会改变土壤表层微生物生物量及群落结构,从而影响微生物对土壤酶的分泌策略,进而影响不同类型土壤酶的活性。在土壤碳循环过程中,不同土壤微生物分泌的胞外酶具有不同的功能,胞外酶活性的变化能够很大程度上影响土壤有机碳的分解、转化与储存。土壤水解酶(如 β-葡萄糖苷酶和纤维素酶等)主要催化土壤中不稳定有机碳的分解,包括催化易氧化有机碳、土壤水溶性有机碳和土壤颗粒性有机碳等的分解。其中 β-葡萄糖苷酶可以催化土壤中的纤维素和碳水化合物的聚合物水解生成葡萄糖,供微生物吸收利用[10];纤维素酶主要是催化土壤中纤维素的水解[11]。土壤氧化还原酶(如酚氧化物酶和过氧化物酶等)则参与土壤中难分解碳的分解,酚氧化物酶催化土壤中的一元酚,二元酚及其他含酚羟基的多元酚的芳香族化合物的氧化分解[12];过氧化物酶可催化土壤中木质素的分解[13]。Rietl 和 Jackson[14] 研究表明人为火烧降低了美国密西西比河北部介子林土壤 β-葡萄糖苷酶活性,Boerner 等[15] 研究发现自然火灾后美国东南部卡罗莱纳州山麓地带火炬松林土壤酸性磷酸酶,几丁质酶和酚氧化物酶活性降低,并为土壤碳长期储存提供管理依据。国内有关火烧对土壤酶活性的影响研究主要集中在兴安落叶林[16],陈礼清等[17] 对四川盆地巨桉人工林的研究结果表明炼山后土壤水解酶活性降低,而过氧化氢酶活性升高。目前关于火烧对中亚热带马尾松人工林土壤酶活性的影响研究较少。

地球表层 1 m 土层深度的土壤有机碳储量约为 1400—1500 Pg,占地球总碳储量的 60%,是陆地植被碳库(500—600 Pg)的 2—3 倍,约是全球大气碳库(750 Pg)的 2 倍[18],在全球碳平衡过程中具有重要作用。环境因子的微小变化,都可能对土壤碳库造成重要影响,进而影响全球大气 CO_2 浓度。火烧会使地表温度急剧升高,地表有机质通过氧化作用导致土壤有机碳的损失[19]。林火能直接燃烧土壤有机碳,可以使土壤有机碳以 CO_2 形式排放进入大气,还可以通过继发性的侵蚀作用或者改变碳的输入和输出等过程从而改变土壤碳库[20]。同时,不同土壤碳组分对林火的响应也不同[21-23]。土壤微生物量碳是土壤有机碳的活性组分,对外界环境变化响应较敏感,土壤微生物量碳与有机碳的比值还是用来指示土壤有机碳的累积、平衡与损耗的重要指标[24];土壤溶解性有机碳与土壤微生物量碳具有很高的相关性[25],可以作为评价土壤微生物分解利用土壤速效养分的重要指标;土壤易氧化碳是土壤中较易氧化分解的有机碳,是反映土壤有机碳早期变化的重要指标[26];土壤颗粒性有机碳可用 53 μm 筛进行分选,其腐殖化程度较低但生物活性较高,在土壤中分解相对较快,可以认为是土壤中有机碳变化的敏感指标[27]。国外有关于火烧对土壤有机碳组分影响的大量研究,如 Martí-Roura 等[28] 研究了火烧后地中海草地和灌木林土壤颗粒有机质组分在土壤中的稳定,Neff 等[29] 对美国阿拉斯加州中部的黑云杉生态系统的研究表明,自然火灾发生后一年的土壤碳密度低于未火烧水平,Jiménez-Morillo 等[30] 则从有机质组分的分子结构角度研究了火烧对西班牙西南部多尼亚纳国家公园典型的地中海橡木林砂质土壤有机碳的影响,结果表明,火烧样地土壤中的有机化合物主要来源于木质素以及火烧过程中高温所产生的多环芳烃。目前国内关于火烧对生态系统的影响研究也多集中在东北地区[31-32],赵志霞等[21] 和

袁强等[22]的研究表明林火降低了中国北亚热带天然马尾松林土壤有机碳和兴安落叶林土壤溶解性有机碳含量,张茂增等[23]也研究了火烧对大兴安岭樟子松天然林土壤有机碳组分的影响,结果表明轻度火烧后土壤有机碳、易氧化碳和颗粒性有机碳均有所降低。而目前关于林火对中亚热带马尾松人工林土壤有机碳组分的研究却少有报导。

本文以中亚热带马尾松人工林火烧迹地为研究对象,对火烧后马尾松林土壤几种与碳分解相关酶活性和几种有机碳组分进行了研究,旨在阐明马尾松人工林采伐迹地火烧后土壤几种有机碳组分的变化特征,以期从酶活性变化的角度分析土壤有机碳变化的原因,可以丰富火烧对于中亚热带马尾松人工林土壤碳分解相关酶活性与有机碳组分关系的研究,并为中亚热带马尾松人工林土壤碳库管理提供理论依据。

1　研究样地概况

研究区位于福建省南平市延平区福建农林大学西芹教学林场(26°33′47″N, 118°6′39″E),海拔高度200—500 m 之间。气候为中亚热带季风气候,年均气温 19.4℃,年最低温度为-5.8℃,极端最高温为 41℃;年均降雨量 1817 mm,雨量充沛。降雨集中在 6—8 月份之间,7 月份常有台风和暴雨,地表温度 17.2℃,年均日时数 1807.8 h,无霜期 302 d。土壤主要为黄红壤[33]。林下植被主要为狗脊(*Woodwardia japonica*)、黑莎草(*Gahnia tristis*)、江南卷柏(*Selaginella moellendorffii*)、鱼腥草(*Houttuynia cordata*)、江南短肠蕨(*Allantodia Metteniana*)、铁角蕨(*Asplenium trichomanes*)、草珊瑚(*Sarcandra hainanenensis*)和构棘(*Cudrania cochinchinensis*)等。

2　研究方法

2.1　实验设计

试验地选择林场院口工区 33 年生马尾松人工林。在 2016 年 3 月 21 日,对林场-马尾松采伐迹地进行火烧处理(炼山)。于 2016 年 3 月 27 日在火烧样地中设置两个处理,分别为对照组(CK)和实验组(BU)两个处理,对照组为林地边缘未经火烧样方,实验组为火烧后样方。每个火烧样方面积为 100 m^2(10 m×10 m)。对照组和实验组均设置 4 个重复样方。

于火烧后一年(2017 年 3 月 21 日)进行土壤样品采集,在各样方内按 S 型采样法选择 5 个点。采样时分别选取 0—10 cm 和 10—20 cm 土层采集土壤样品。采集样品后,将每个样方采集的同一土层的 5 个样品均匀混合成 1 个混合土样。土样带回实验室后,挑拣出植物残茬和石砾等,将土壤磨碎过 2 mm 筛,使土壤充分混匀。将混匀后的土壤样品分成两份,一份装于自封袋中用于测定土壤酶活性和微生物量碳,另一份土壤样品风干用于测定土壤 pH 和土壤有机碳组分。另外,从风干土样中取 5 g 左右土壤,用研钵磨细,过 0.149 mm 筛,用于测定土壤总碳、全氮和全磷等。

2.2　土壤样品测定

土壤含水量测定采用铝盒烘干法。土壤全氮测定采用半微量凯氏法,用硫酸钾-硫酸铜-硒粉消煮,再用凯氏定氮仪自动分析。土壤总碳测定采用元素分析仪自动分析法。土壤全磷测定采用硫酸-高氯酸消解,钼蓝比色法。土壤 pH 值测定采用电位法,以水土比 2.5∶1 混匀后用 pH 计测定。

土壤水解酶活性采用对硝基酚(*p*NP)法测定[34]。β-葡萄糖苷酶活性测定以对硝基苯-β-D 吡喃葡糖苷为基质,以 pH 12.0 Tris 为缓冲液,通过水解产生对硝基酚,再用酶标仪进行光度测定[35]。纤维素酶活性测定以对硝基苯纤维二糖苷为底物,缓冲液为 pH 5.0 MUB,用酶标仪对水解产生的对硝基酚进行光度测定[34]。酚氧化物酶和过氧化物酶活性测定分别以左旋多巴(DOPA)和 DOPA 加过氧化氢(H_2O_2)为底物[4],缓冲溶液为 pH 5.0 的醋酸缓冲液。在土壤酶活性测定同时分别做无土空白和不加底物的对照。实验组、空白组和对照组均同时做 3 个重复。水解酶活性用每小时每克土壤催化产生的对硝基酚的纳摩尔浓度表示(nmol h^{-1} g^{-1})。氧化还原酶活性用每小时每克土壤氧化底物的微摩尔浓度表示(μmol $h^{-1}g^{-1}$)。

土壤颗粒有机碳测定以六偏磷酸钠($NaPO_3$)$_6$为分散剂进行分离,用手摇和恒温震荡箱震荡的方法进行长时间震荡分散,用 53 μm 筛分选烘干(60℃)后用元素分析仪分析[36]。土壤微生物量碳测定采用氯仿熏蒸-0.5 mol/L K_2SO_4提取法,用 TOC 仪分析测定[37]。土壤易氧化碳测定采用 0.333 mol/L $KMnO_4$氧化法测定,根据剩余的 $KMnO_4$含量可以算得氧化土壤有机碳消耗的 $KMnO_4$的量,进而得出土壤中易氧化碳含量。土壤水溶性碳测定采用 2 mol/L KCl 浸提,再用 TOC 仪测定[38]。土壤微生物量碳和土壤溶解性有机碳的单位以 mg/kg 表示。土壤易氧化碳和颗粒性碳的单位以 g/kg 表示。

2.3 数据处理

应用 Excel 对实验数据进行计算和整理。用 SPSS 19.0 对数据的差异显著性进行 one-way ANOVA 分析,数据分析采用独立样本 T 检验,显著水平设置为 $P<0.05$。用 SigmaPlot 12.5 软件进行作图。

3 结果与分析

3.1 火烧对马尾松林土壤理化性质的影响

火烧后,马尾松人工林 0—10 cm 土层土壤 pH 值比对照升高 0.61 个单位($P<0.05$),土壤总碳含量显著低于对照($P<0.05$),全氮含量降低 17.5%($P>0.05$),土壤含水量与对照相比显著降低($P<0.05$)。在对照样地中,0—10 cm 土层比 10—20 cm 土层土壤总碳含量高 47.8%($P<0.05$),0—10 cm 土层土壤全氮含量显著高于 10—20 cm 土层($P<0.05$)。火烧样地中,0—10 cm 土层比 10—20 cm 土层土壤 pH 高 0.45 个单位,但无显著差异。0—10 cm 土层比 10—20 cm 土层土壤总碳含量高 15.4%($P>0.05$)。0—10 cm 土层和 10—20 cm 土层土壤含水量火烧均显著低于对照($P<0.05$)(表 1)。

表 1 火烧对马尾松林土壤理化性质的影响($n=4$)

Table 1 Effects of fire on soil physical and chemical properties of *Pinus massoniana* forest($n=4$)

土壤理化性质 Soil physical and chemical properties	0—10 cm		10—20 cm	
	CK	BU	CK	BU
pH	4.23±0.10a	4.84±0.21bA	4.24±0.06	4.39±0.15B
总碳 Total carbon/(g/kg)	21.87±1.98aA	15.51±0.66b	14.80±0.93B	13.44±4.78
全氮 Total nitrogen /(g/kg)	2.52±0.21A	2.08±0.25	2.07±0.11B	2.01±0.25
全磷 Total phosphorus/(g/kg)	0.12±0.01	0.12±0.03	0.10±0.01	0.10±0.02
土壤含水量 Water content/%	24.72±2.00a	19.51±0.70b	27.94±1.74a	20.35±0.83b

数值为平均值±标准差。CK:对照 control;BU:火烧 burn。大写字母不同表示土层之间差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示 CK 和 BU 之间差异显著($P<0.05$)

3.2 火烧后土壤酶活性的变化特征

由图 1 可知,火烧后 0—10 cm 土层中,土壤 β-葡萄糖苷酶活性显著降低($P<0.05$)。酚氧化物酶活性和过氧化物酶活性均高于对照($P<0.05$)。在 10—20 cm 土层中,火烧后土壤 β-葡萄糖苷酶活性降低 34.28 nmol $h^{-1}g^{-1}$,且具有极显著差异 ($P<0.01$)。火烧样地中,土壤 β-葡萄糖苷酶活性 0—10 cm 土层显著高于 10—20 cm 土层($P<0.05$),土壤酚氧化物酶和过氧化物酶活性在土层间无显著差异。

3.3 火烧后土壤有机碳组分的变化特征

由图 2 可知,火烧后 0—10 cm 土层土壤总碳含量为 15.51 g/kg,显著低于对照($P<0.05$),土壤溶解性有机碳含量降低 29.47 mg/kg($P<0.05$),土壤颗粒有机碳(>53 μm 颗粒性有机碳)和土壤粘粒有机碳(<53 μm 颗粒性有机碳)含量分别降低 3.66 g/kg 和 0.17 g/kg,但均无显著差异。在对照样地中,0—10 cm 土层土壤总碳含量极显著高于 10—20 cm 土层($P<0.01$)。在对照样地和火烧样地中,土壤几种有机碳组分含量都表现为 0—10 cm 土层高于 10—20 cm 土层,但均无显著差异。

3.4 火烧后土壤有机碳组分和土壤总碳比例的变化

由图 3 可知,0—10 cm 土层中,火烧后土壤颗粒有机碳/总碳显著降低 36.7%($P<0.05$)。10—20 cm 土

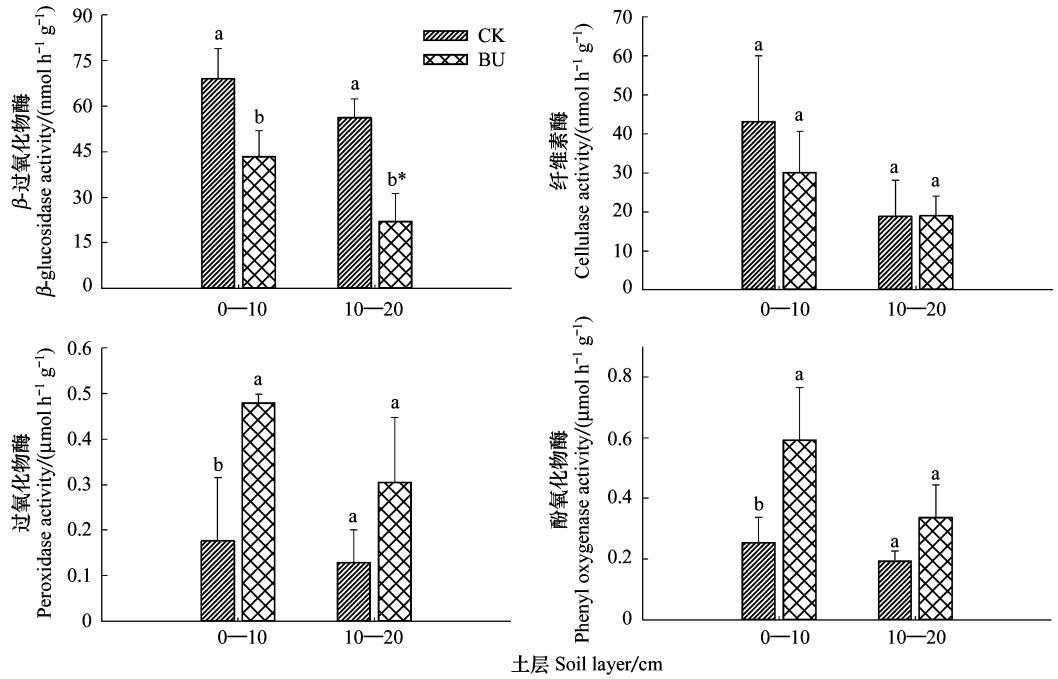

图 1　火烧后土壤酶活性的变化特征

Fig.1　Characteristics of soil enzyme activities after burning

CK:对照 control;BU:火烧 burn;图中小写字母不同表示 CK 和 BU 之间差异显著(P<0.05),* 表示不同土层之间有显著差异(P<0.05)

层,土壤微生物量碳/总碳、土壤溶解性有机碳/总碳和土壤易氧化碳/总碳分别为火烧低于对照 24.5%、55.6%、43.0%,但无显著差异。对照样地中,土壤易氧化碳/总碳 10—20 cm 土层高于 0—10 cm 土层,具有极显著差异(P<0.01)。

4　讨论

林火会影响土壤元素的生物地球化学循环,影响土壤有机质矿化过程,进而改变土壤的肥力状况。火烧短时间内改变了地表温度,使土壤微生物的生存条件发生改变,因此土壤微生物对土壤养分的利用情况发生变化,从而间接影响了土壤的一系列生态指标特征[39-40]。火烧对土壤理化性质的影响主要发生在 0—5 cm 的表层土壤[41]。研究结果表明,火烧后马尾松林地表层土壤的 pH 值显著升高,这与 Fisher 等[42]的结论一致,可能是由于火烧后土壤表层阳离子交换总量增加导致土壤碱度增加。本研究表明,火烧后土壤总碳和全氮含量降低,土壤全磷含量没有显著变化。土壤碳、氮含量降低是由于土壤有机碳、氮经过燃烧直接转化为二氧化碳和氮氧化物排放进入大气中[43],而本研究中氧化酶活性的升高也可能是土壤碳降低的重要原因。土壤全磷含量变化不大原因可能是火烧样地经过雨水的冲刷和风力等自然力的作用导致灰烬中磷很少渗入到土壤中,或者是由于地表采伐物较少,没有对土壤磷元素产生影响[44-46]。

土壤酶是评价土壤微生物生态功能的重要指标。本研究结果表明,火烧后土壤 β-葡萄糖苷酶活性降低,吴波波等[47]也认为火烧会降低米槠天然更新次生林土壤水解酶活性。目前关于火烧对土壤纤维素酶的研究相对较少[48],本研究表明火烧后纤维素酶活性降低,而酚氧化物酶活性和过氧化物酶活性在表层土壤中升高,这也与吴波波等[47]、Boerner 等[49]和 Tas 等[50]对米槠次生林,白栎阔叶林和针叶林的土壤酶活性研究结果一致。已有研究表明,导致土壤 β-葡萄糖苷酶活性和纤维素酶活性降低的原因是土壤中活性有机碳含量降低,容易被微生物分解利用的活性有机碳减少导致微生物对水解酶的分泌减少[51],本实验结果显示火烧后土壤微生物量碳、水溶性有机碳、易氧化有机碳和颗粒有机碳含量降低,微生物分泌的水解酶(β-葡萄糖苷酶和纤维素酶)含量也降低,这表明火烧后微生物易利用的底物减少,从而可能导致土壤微生物分泌的酶减少,

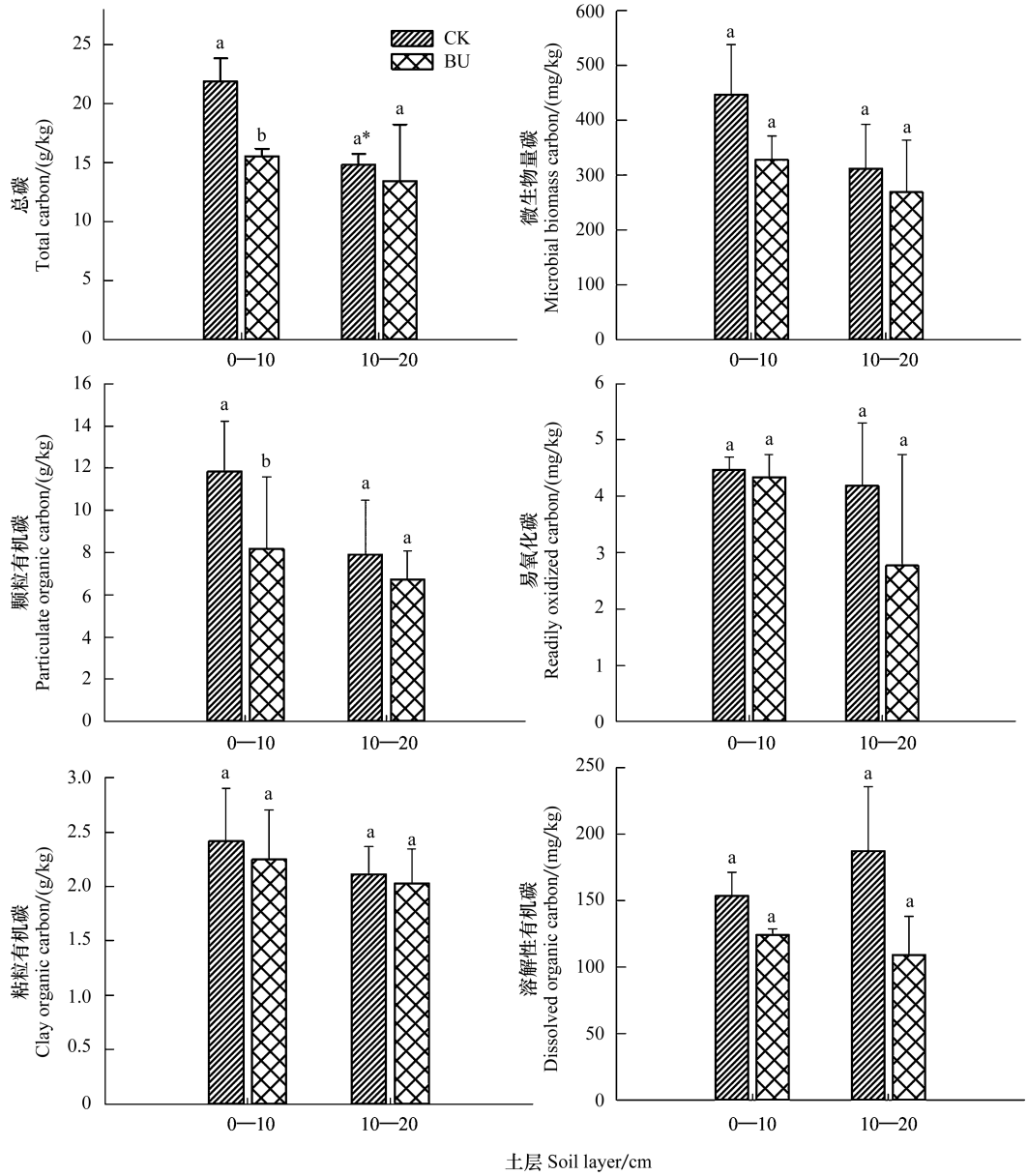

图 2 火烧后土壤有机碳组分的变化特征

Fig.2 Characteristics of soil organic carbon fractions after burning

进而降低土壤水解酶活性。土壤氧化酶(酚氧化物酶和过氧化物酶)主要分解土壤难分解碳[52],火烧后土壤活性碳含量降低,微生物可能改变群落结构分泌更多的氧化酶。

火烧会导致土壤有机碳含量产生变化。如韩春兰等[53]研究表明,轻度火烧后大兴安岭兴安落叶松林区土壤有机碳含量降低,本文的研究结果与此一致。但也有研究表明火烧后土壤有机碳含量升高[54],尹云峰等[55]发现,火烧后杉木人工林土壤有机碳含量变化不显著。导致上述结果的原因可能是林火的类型,强度以及地质因素的不同[54]。Wang[56]等 Meta 分析发现,火烧后土壤微生物量碳含量减少 40.5%,也与本研究结果相似,Fritze 等[57]也发现,针叶林火烧后土壤微生物量碳需要较长的时间才能恢复到火烧前水平。土壤溶解性有机碳与土壤微生物量碳含量具有很高的正相关性,因此火烧后其变化与土壤微生物量碳相似[22]。本研究中颗粒有机碳含量减少,且 0—10 cm 土层土壤颗粒有机碳含量变动较大,可能是火烧破坏了表层土壤结构,使受团聚体保护的碳裸露于空气中,微生物对其利用效率更高[58]。对于易氧化碳,研究结果中 0—10 cm 土层土壤易氧化碳含量降低,这与张茂增等[29]研究发现火烧后樟子松林土壤易氧化碳含量减少结果一致,原

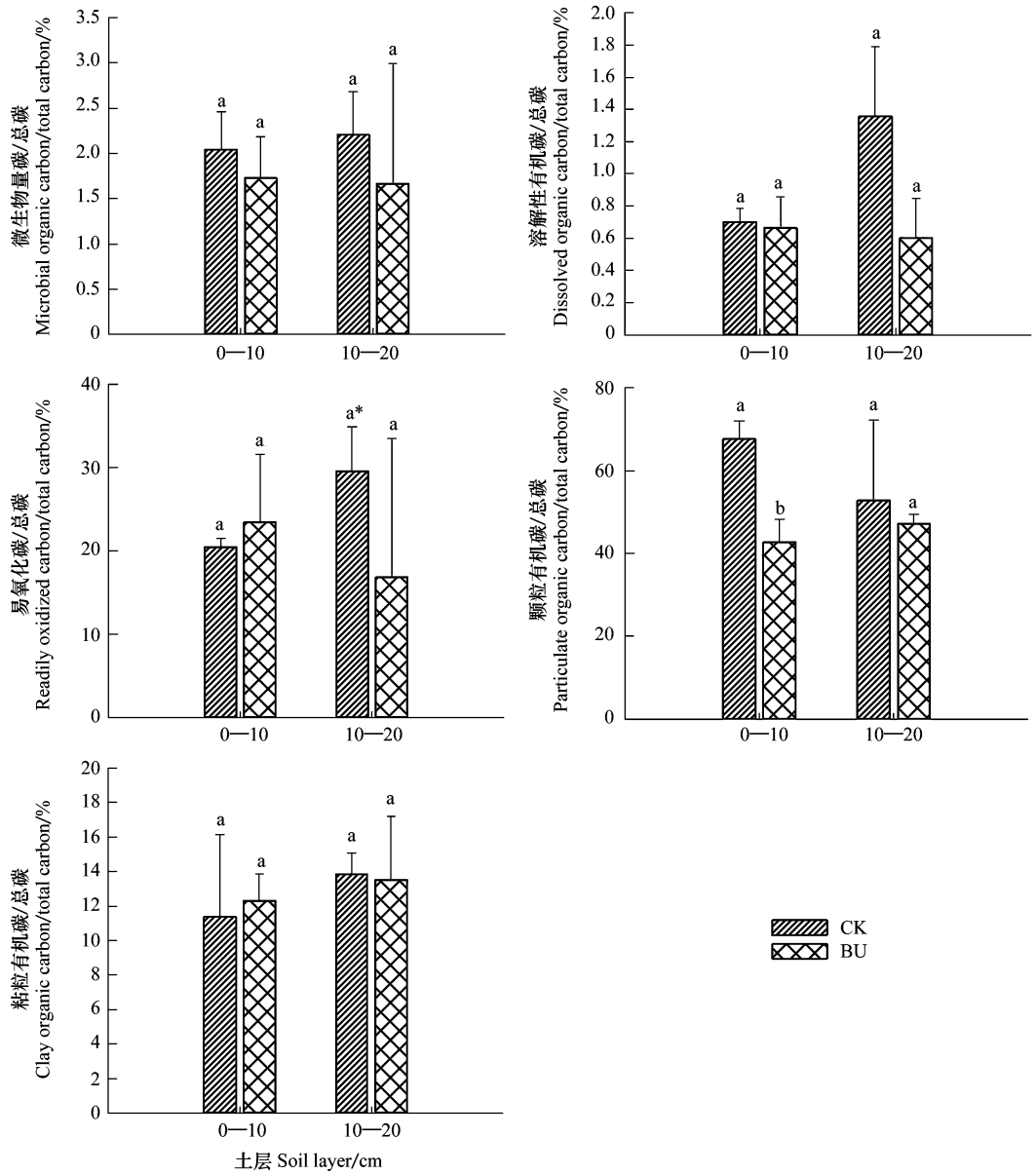

图 3　火烧后土壤有机碳组分和土壤总碳比例的变化

Fig.3　The varition of soil organic carbon fractions and soil total carbon ratio after burning

因是由于土壤易氧化碳在火烧条件下发生氧化分解而损失。本研究发现,火烧后微生物量碳、溶解性有机碳、颗粒有机碳和易氧化碳与总碳的比例在 0—10 cm 土层土壤中降低,而粘粒有机碳与总碳的比例升高,原因是土壤不稳定有机碳对火烧高温过程更加敏感,而土壤惰性有机碳性质稳定不易被短时快速的林火破坏[29]。10—20 cm 土层土壤几种碳与总碳的比例趋势相似,原因可能是林火对浅层土壤有机碳影响较大,对深层土壤有机碳的扰动较小。火烧强度的不同以及实验样地土壤条件的不同,可能是本研究结果与其他研究结果不同的重要因素[54]。

5　结论

火烧后马尾松人工林 0—20 cm 土层土壤的水解酶(β-葡萄糖苷酶和纤维素酶)活性显著降低,而 0—10 cm 土层土壤的酚氧化物酶和过氧化物酶活性显著升高。

马尾松人工林土壤的微生物量碳,颗粒有机碳、溶解性有机碳和易氧化有机碳在火烧后一年含量明显降低;但是土壤粘粒有机碳含量变化不显著。

参考文献(References):

[1] Thonicke K, Venevsky S, Sitch S, Cramer W. The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a dynamic global vegetation model. Global Ecology and Biogeography, 2001, 10(6): 661-677.

[2] Hamman S T, Burke I C, Knapp E E. Soil nutrients and microbial activity after early and late season prescribed burns in a Sierra Nevada mixed conifer forest. Forest Ecology and Management, 2008, 256(3): 367-374.

[3] 舒立福, 田晓瑞, 李红. 世界森林火灾状况综述. 世界林业研究, 1998, 11(6): 41-47.

[4] Hill B H, Elonen C M, Seifert L R, May A A, Tarquinio E. Microbial enzyme stoichiometry and nutrient limitation in US streams and rivers. Ecological Indicators, 2012, 18: 540-551.

[5] Shackle V, Freeman C, Reynolds B. Exogenous enzyme supplements to promote treatment efficiency in constructed wetlands. Science of the Total Environment, 2006, 361(1/3): 18-24.

[6] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 刘文飞, 刘苑秋. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响. 生态学报, 2012, 32(2): 517-527.

[7] Khan M S, Sadat S U, Jan A, Munir I. Impact of transgenic *Brassica napus* harboring the antifungal synthetic chitinase (NiC) gene on rhizosphere microbial diversity and enzyme activities. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1307.

[8] Li B T, Chen Y R, Liang W Z, Mu L L, Bridges W C, Jacobson A R, Darnault C J G. Influence of cerium oxide nanoparticles on the soil enzyme activities in a soil-grass microcosm system. Geoderma, 2017, 299: 54-62.

[9] Wei J, Zhang X Y, Liu X Y, Liang X, Chen X P. Influence of root components of celery on pyrene bioaccessibility, soil enzymes and microbial communities in pyrene and pyrene-diesel spiked soils. Science of the Total Environment, 2017, 599-600: 50-57.

[10] Boerner R E J, Brinkman J A. Fire frequency and soil enzyme activity in southern Ohio oak-hickory forests. Applied Soil Ecology, 2003, 23(2): 137-146.

[11] Deng S P, Tabatabai M A. Cellulase activity of soils. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(10): 1347-1354.

[12] Sinsabaugh R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(3): 391-404.

[13] 杨文彬, 耿玉清, 王冬梅. 漓江水陆交错带不同植被类型的土壤酶活性. 生态学报, 2015, 35(14): 4604-4612.

[14] Rietl A J, Jackson C R. Effects of the ecological restoration practices of prescribed burning and mechanical thinning on soil microbial enzyme activities and leaf litter decomposition. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 50:47-57.

[15] Boerner R E J, Waldrop T A, Shelburne V B. Wildfire mitigation strategies affect soil enzyme activity and soil organic carbon in loblolly pine (*Pinus taeda*) forests. Canadian Journal of Forest Research, 2006, 36(12):3148-3154.

[16] 宝日玛, 峥嵘, 周梅, 郜图雅. 大兴安岭火烧迹地土壤微生物生物量及酶活性研究. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2016(4):77-83.

[17] 陈礼清, 罗承德, 宫渊波, 张健. 炼山对巨桉人工幼林土壤酶活性和有效养分的影响. 东北林业大学学报, 2014, 42(3):89-92, 102-102.

[18] Schlesinger W H, Lichter J. Limited carbon storage in soil and litter of experimental forest plots under increased atmospheric CO_2. Nature, 2001, 411(6836): 466-469.

[19] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 尹云峰, 谢锦升. 火烧对森林土壤有机碳的影响研究进展. 生态学报, 2015, 35(9): 2800-2809.

[20] 郑蔚, 李超, 元晓春, 郑永, 陈岳民, 林伟盛, 杨玉盛. 皆伐火烧对亚热带森林不同深度土壤 CO_2通量的影响. 生态学报, 2017, 37(4): 1221-1231.

[21] 赵志霞, 李正才, 周君刚, 程彩芳, 赵睿宇, 孙娇娇. 火烧对中国北亚热带天然马尾松林土壤有机碳的影响. 生态学杂志, 2016, 35(1): 135-140.

[22] 袁强, 魏云敏. 不同强度火烧对兴安落叶松林土壤溶解性有机碳的影响. 安徽农业科学, 2015, 43(12):85-87, 133-133.

[23] 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.

[24] 吴建平, 梁国华, 熊鑫, 褚国伟, 周国逸, 张德强. 鼎湖山季风常绿阔叶林土壤微生物量碳和有机碳对模拟酸雨的响应. 生态学报, 2015, 35(20): 6686-6693.

[25] Zak D R, Grigal D F, Gleeson S, Tilman D. Carbon and nitrogen cycling during old-field succession: Constraints on plant and microbial biomass. Biogeochemistry, 1990, 11(2): 111-129.

[26] 余健, 房莉, 卞正富, 汪青, 俞元春. 土壤碳库构成研究进展. 生态学报, 2014, 34(17): 4829-4838.

[27] 方华军, 杨学明, 张晓平, 梁爱珍, 申艳. 东北黑土区坡耕地表层土壤颗粒有机碳和团聚体结合碳的空间分布. 生态学报, 2006, 26(9): 2847-2854.

[28] Martí-Roura M, Rovira P, Casals P, Romanyà J. Post-fire mineral N allocation and stabilisation in soil particle size fractions in Mediterranean grassland and shrubland. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 75:124-132.

[29] Neff J C, Harden J W, Gleixner G. Fire effects on soil organic matter content, composition, and nutrients in boreal interior Alaska. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(9):2178-2187.

[30] 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.
[31] Chang Y, He H S, Bishop I, Hu Y M, Bu R C, Xu C G, Li X Z. Long-term forest landscape responses to fire exclusion in the Great Xing′an Mountains, China. International Journal of Wildland Fire, 2007, 16(1):34-44.
[32] 孙明学, 贾炜玮, 吴瑶. 大兴安岭北部地区林火对土壤化学性质的影响. 东北林业大学学报, 2009, 37(5):33-35.
[33] 刘圣恩, 林开敏, 蔡锰柯, 郑文辉, 石丽娜, 陈梦瑶, 周丽春, 郭玉硕, 何宗明. 近自然生态恢复条件下杉木老龄林群落优势树种种群结构与空间格局. 应用与环境生物学报, 2015, 21(3):540-546.
[34] Verchot L V, Borelli T. Application of *para*-nitrophenol (*p*NP) enzyme assays in degraded tropical soils. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(4): 625-633.
[35] Deforest J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and L-DOPA. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(6):1180-1186.
[36] 李鉴霖, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式土壤有机碳组分特征. 生态学报, 2015, 35(11): 3733-3742.
[37] Lungmuana, Singh S B, Vanthawmliana, Saha S, Dutta S K, Rambuatsaiha, Singh A R, Boopathi T. Impact of secondary forest fallow period on soil microbial biomass carbon and enzyme activity dynamics under shifting cultivation in North Eastern Hill region, India. Catena, 2017, 156: 10-17.
[38] Wang H, He Z L, Lu Z M, Zhou J Z, Van Nostrand J D, Xu X H, Zhang Z J. Genetic linkage of soil carbon pools and microbial functions in subtropical freshwater wetlands in response to experimental warming. Applied and Environmental Microbiology, 2012, 78(21): 7652-7661.
[39] Turner M G, Romme W H, Smithwick E A H, Tinker D B, Zhu J. Variation in aboveground cover influences soil nitrogen availability at fine spatial scales following severe fire in subalpine conifer forests. Ecosystems, 2011, 14(7): 1081-1095.
[40] Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review. Oecologia, 2005, 143(1): 1-10.
[41] 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. 生态学报, 2011, 31(19): 5809-5817.
[42] Binkley D, Fisher R F. Ecology and management of forest soils. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012: 73-74.
[43] Wanthongchai K, Bauhus J, Goldammer J G. Nutrient losses through prescribed burning of aboveground litter and understorey in dry dipterocarp forests of different fire history. Catena, 2008, 74(3): 321-332.
[44] 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.
[45] 田昆. 火烧迹地土壤磷含量变化的研究. 西南林学院学报, 1997, 17(1): 21-25.
[46] 姜勇, 诸葛玉平, 梁超, 张旭东. 火烧对土壤性质的影响. 土壤通报, 2003, 34(1): 65-69.
[47] 吴波波, 郭剑芬, 吴君君, 任卫岭, 刘小飞, 杨玉盛. 采伐剩余物对林地表层土壤生化特性和酶活性的影响. 生态学报, 2014, 34(7): 1645-1653.
[48] 薛立, 邝立刚, 陈红跃, 谭绍满. 不同林分土壤养分、微生物与酶活性的研究. 土壤学报, 2003, 40(2):280-285.
[49] Boerner R E J, Brinkman J A, Smith A. Seasonal variations in enzyme activity and organic carbon in soil of a burned and unburned hardwood forest. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(8): 1419-1426.
[50] Ta N, Prestat E, McFarland J W, Wickland K P, Knight R, Berhe A A, Jorgenson T, Waldrop M P, Jansson J K. Impact of fire on active layer and permafrost microbial communities and metagenomes in an upland Alaskan boreal forest. The ISME Journal, 2014, 8(9): 1904-1919.
[51] 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展. 林业科学, 2004, 40(2): 152-159.
[52] 胡亚林, 汪思龙, 颜绍馗, 高洪. 杉木人工林取代天然次生阔叶林对土壤生物活性的影响. 应用生态学报, 2005, 16(8): 1411-1416.
[53] 韩春兰, 邵帅, 王秋兵, 李甄, 孙仲秀, 毛伟伟. 兴安落叶松林火干扰后土壤有机碳含量变化. 生态学报, 2015, 35(9): 3023-3033.
[54] González-Pérez J A, González-Vila F J, Almendros G, Knicker H. The effect of fire on soil organic matter—a review. Environment International, 2004, 30(6): 855-870.
[55] 尹云锋, 杨玉盛, 高人, 陈光水, 谢锦升, 钱伟, 赵月彩. 皆伐火烧对杉木人工林土壤有机碳和黑碳的影响. 土壤学报, 2009, 46(2): 352-355.
[56] Wang Q K, Zhong M C, Wang S L. A meta-analysis on the response of microbial biomass, dissolved organic matter, respiration, and N mineralization in mineral soil to fire in forest ecosystems. Forest Ecology and Management, 2012, 271: 91-97.
[57] Fritze H, Pennanen T, Pietikäinen J. Recovery of soil microbial biomass and activity from prescribed burning. Canadian Journal of Forest Research, 1993, 23(7): 1286-1290.
[58] 刘梦云, 常庆瑞, 齐雁冰, 孙宁. 黄土台塬不同土地利用土壤有机碳与颗粒有机碳. 自然资源学报, 2010, 25(2): 218-226.