

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20160420

火烧对河北平泉油松林土壤微生物量的影响

李伟克 刘晓东 牛树奎 李炳怡 刘冠宏 褚艳琴

(北京林业大学林学院)

摘要:以河北平泉油松林近期(火后半年)火烧迹地为研究对象,根据树干熏黑高度和树木死亡率情况,划分不同火烧强度(轻度、中度、重度),并以邻近未火烧区设置对照样地,采用氯仿熏蒸浸提法测定各研究区土壤微生物量碳、氮(C_{mic} 、 N_{mic}),分析不同强度火烧对其土壤微生物量碳、氮(C_{mic} 、 N_{mic})的影响。结果表明:不同强度火烧后土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 含量均呈下降的趋势,不同土层间土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 含量随土层深度增加而逐渐减小,土壤 C_{mic} 变化在34~205 mg/kg之间,土壤 N_{mic} 变化在7~40 mg/kg之间;土壤微生物量碳氮比(C_{mic}/N_{mic})整体处于5~6之间。双因素方差分析表明:火烧强度、土层深度及二者的交互作用对土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、铵态氮(NH_4^+ -N)、硝态氮(NO_3^- -N)均有显著影响($P < 0.05$),对于土壤pH值,仅火烧强度对其影响显著($P < 0.05$);同时,火烧强度、土层深度及二者的交互作用对土壤 C_{mic} 和 N_{mic} 的影响均达到极显著水平($P < 0.01$)。土壤养分(SOC、TN、 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N)主要集中在表层(0~10 cm),重度火烧后土壤养分含量显著减少,同时,土壤pH显著升高。相关分析结果表明:土壤有机碳、全氮对土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 有极显著影响($P < 0.01$),土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 含量与土壤有机碳、全氮均呈正相关。主成分分析进一步表明土壤有机碳、全氮是影响土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 的主要因素。

关键词:林火; 火烧强度; 土壤理化性质; 土壤微生物量

中图分类号:S762.8; S714.3 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2017)10-0070-08

LI Wei-ke; LIU Xiao-dong; NIU Shu-kui; LI Bing-yi; LIU Guan-hong; CHU Yan-qin. **Impact of fire on soil microbial biomass of *Pinus tabuliformis* forest in Pingquan County, Hebei of northern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2017)39(9) 70-77 [Ch, 33 ref.] College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China.

In the burned area of *Pinus tabuliformis* forest in Pingquan County, Hebei of northern China, we measured soil microbial biomass carbon (C_{mic}), nitrogen (N_{mic}) of different fire intensity regions with a fumigation-extraction method after burned half a year. The study area was classified into different levels according to the smoked height and tree mortality: high-severity sites, middle-severity sites, low-severity sites and nearby unaffected sites. The purpose of our research was to explore the effects of different severity fire on C_{mic} and N_{mic} . The results showed that both C_{mic} and N_{mic} decreased after different intensity burning and gradually declined with the soil depth. C_{mic} ranged from 34~205 mg/kg; N_{mic} ranged from 7~40 mg/kg; C_{mic}/N_{mic} was wholly at 5~6. Two-way ANOVA showed that fire severity, soil layer and the interaction of the two factors had significant effects on soil organic carbon (SOC), soil total nitrogen (TN), NH_4^+ -N, NO_3^- -N ($P < 0.05$). However, soil pH was only positively correlated with fire severity ($P < 0.05$). Meanwhile, fire severity, soil layer and the interaction of the two factors had significant effects on C_{mic} and N_{mic} ($P < 0.01$). Soil nutrients were distributed mainly in the 0~10 cm layer and dropped sharply after the high-severity fire. Besides, soil pH increased significantly after the high-severity fire. The correlation analysis result showed that SOC and TN influenced the C_{mic} and N_{mic} extremely significantly ($P < 0.01$).

收稿日期: 2016-12-29 修回日期: 2017-03-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD060010006)、国家自然科学基金项目(31270696)。

第一作者: 李伟克, 博士生。主要研究方向: 生态管理与规划。Email: lk2016@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京市海淀区清华东路35号北京林业大学林学院。

责任作者: 刘晓东, 副教授。主要研究方向: 生态管理与规划。Email: xd-liu@bjfu.edu.cn 地址: 同上。牛树奎, 教授。主要研究方向: 生态管理与规划。Email: shukuiniu@163.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

The soil microbial biomass was positively correlated with SOC and TN. Principal component analysis further prove that SOC and TN are the main factors affecting C_{mic} and N_{mic}.

Key words forest fire; fire intensity; soil physiochemical characteristics; soil microbial biomass

土壤微生物量是指土壤中体积小于 $5 \times 10^3 \mu\text{m}^3$ 的微生物总量, 主要包括细菌、真菌、放线菌、原生动物和显微藻类等^[1], 其中微生物量碳、氮是土壤微生物量的主要组成部分, 虽然在土壤有机质库中所占比例较小, 但在生态系统碳、氮及其他养分循环过程中具有十分重要的作用^[2]。火是森林生态系统最主要的干扰之一, 它通过高温直接影晌土壤微生物群落或改变土壤环境因子来对微生物群落间接产生影响^[3]。一方面, 火烧产生的高温可以直接导致土壤微生物量的大幅度降低, 尤其是真菌的生物量, 这种情况通常发生在土壤表层^[4]。另一方面, 火烧会影响土壤的物理和化学性质, 如高温会破坏土壤的团粒结构, 降低土壤孔隙度, 甚至发生土壤板结。火烧对土壤化学性质的影响主要表现在将复杂的有机物转化为简单的无机物, 并重新与土壤发生化学反应, 造成土壤的酸碱度和土壤肥力的改变, 虽然土壤环境因子的变化对土壤微生物量的影响是间接的, 但这种影响持续的时间更久, 可能比火烧本身的直接影响还要强^[5]。目前, 国外针对火干扰后土壤微生物量变化的研究较多, 范围较广, 主要集中在不同火烧强度或过火后不同时期内土壤微生物量变化的研究, 或结合土壤理化性质、土壤呼吸及土壤动物等其他相关因素进行研究^[6]。但由于火烧时地理环境的不同, 火烧强度的差异以及火烧后开展研究的时间不同, 使关于火烧对土壤微生物的影响并没有较多统一的定论^[7]。国内关于土壤微生物量的研究起步较晚, 特别是火烧后土壤微生物量的变化研究十分有限, 目前大部分研究主要集中在东北大小兴安岭地区^[8], 而对华北地区油松(*Pinus tabuliformis*)林火烧后短期内土壤微生物量变化的研究还鲜见报道。

油松广泛分布于我国暖温带湿润半湿润地区, 为华北地区山地植被的主要建群种^[9]。大窝铺林区位于河北省平泉县境内, 为平泉乃至华北地区的重点天然油松次生林区^[10]。2015年4月5日, 研究区发生森林火灾, 过火面积约 54 hm²。本文以过火后的火烧迹地为研究对象, 分析其土壤理化性质及微生物量对不同强度火烧干扰的响应, 并探讨土壤微生物量及其影响因子之间的关系, 以期为火烧迹地森林生态系统的恢复和管理提供理论依据。

1 研究地区概况与研究方法

1.1 研究地区概况

研究地区位于河北省承德市平泉县大窝铺林区(118°22' ~ 118°37'E, 41°01' ~ 41°21'N), 该地区平均海拔 660 m, 年均气温 7.3 ℃, 年均降水量 540 mm, 8月份降雨量占 70%, 昼夜温差大, 属于半湿润半干旱大陆性季风型山地气候。土壤类型以棕壤土和褐土为主。森林类型为油松天然次生林, 灌木层主要有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、锦带花(*Weigela florida*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia*)等, 草本以细叶薹草(*Carex rigescens*)为主, 其他组成种有石竹(*Dianthus chinensis*)、大油芒(*Spodiopogon sibiricus*)、银背风毛菊(*Saussurea nivea*)、玉竹(*Polygonatum odoratum*)等^[11]。

1.2 样地设置

以大窝铺林区 2015 年 4 月 5 日发生火烧的天然油松次生林地为研究对象, 并在毗邻选取未火烧林地作为对照, 样地海拔 1 119 ~ 1 143 m, 坡度 20° ~ 23°, 阴坡(其他立地条件基本一致), 林龄划分依据国家林业局《森林资源规划设计调查主要技术规定》(2003) 和《国家森林资源连续清查技术规定》(2003) 中对油松天然林林龄组的划分标准(油松天然林幼龄林≤30 年生、中龄林 31 ~ 50 年生、近熟林 51 ~ 60 年生、成熟林 61 ~ 80 年生、过熟林≥81 年生), 本研究区内为油松成熟林。在火烧迹地上分别选择轻度(L)、中度(M)、重度(H)3 种不同火烧强度的地段, 以及相邻未过火对照林地(CK), 分别设置 3 个 20 m × 20 m 的标准样地(即 3 次重复), 共 12 块样地。火灾强度依据树木死亡率和树干熏黑高度来确定: 轻度火烧的树木死亡率 < 30%, 树干熏黑高度 2 m 以下; 重度火烧的树木死亡率 > 75%, 树干熏黑高度 5 m 以上; 中度火烧的树木死亡率和树干熏黑高度位于两者之间^[12~13], 若存在交叉以树木死亡率为准则, 样地概况如表 1。

1.3 样品采集

于 2015 年 10 月 4 日进行土壤样品的采集。土样采集时, 首先清除土壤表层杂物, 然后用直径 50 mm 的土钻以 5 点取样法采集同一深度的土层样品, 混合为一份土样, 土样分 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 3 层取样, 共计 36 份土壤样品。土样采

表1 样地概况

Tab. 1 General situation of sample plots

样地 Sample plot	火烧程度 Burning degree	平均胸径 Mean DBH/cm	郁闭度 Canopy density	平均树高 Mean height/m	平均熏黑高度 Mean scorched height/m	树木死亡率 Tree mortality/%	优势种 Dominant species
1	重度 High(H)	22.30	<0.10	12.42	12.42	100	大花溲疏 <i>Deutzia grandiflora</i> 、胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> 、照山白 <i>Rhododendron micranthum</i> 、狗尾巴草 <i>Setaria viridis</i> 、鸡腿堇菜 <i>Viola acuminata</i>
2	重度 High	27.10	<0.10	11.05	11.05	100	
3	重度 High	22.49	<0.10	10.95	10.95	100	
4	中度 Moderate(M)	22.87	0.32	11.02	3.64	66.72	油松 <i>Pinus tabuliformis</i> 、土庄绣线菊 <i>Spiraea pubescens</i> 、大花溲疏 <i>Deutzia grandiflora</i> 、小红菊 <i>Dendranthema chanetii</i> 、细叶薹草 <i>Carex duriuscula</i>
5	中度 Moderate	19.90	0.39	9.70	2.85	63.46	
6	中度 Moderate	22.10	0.28	10.80	3.12	54.60	
7	轻度 Light(L)	24.33	0.56	11.99	1.47	16.35	油松 <i>Pinus tabuliformis</i> 、胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> 、土庄绣线菊 <i>Spiraea pubescens</i> 、小红菊 <i>Dendranthema chanetii</i> 、细叶薹草 <i>Carex duriuscula</i>
8	轻度 Light	21.80	0.59	9.90	1.66	18.20	
9	轻度 Light	25.03	0.52	13.66	0.79	13.26	
10	对照 Control(C)	20.90	0.60	11.50	0	0	油松 <i>Pinus tabuliformis</i> 、土庄绣线菊 <i>Spiraea pubescens</i> 、胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i> 、细叶薹草 <i>Carex duriuscula</i> 、毛茛 <i>Ranunculus japonicus</i>
11	对照 Control	23.06	0.69	11.47	0	0	
12	对照 Control	21.17	0.65	10.40	0	0	

集完成后立即装入保温箱带回实验室于0~4℃低温保存,并在一周内完成土壤微生物量碳和氮的测定。同时将一部分土样取出风干,用于理化性质的测定。

1.4 样品室内分析

土壤pH值采用Sartorius PB-10型pH计测定,水土比2.5:1;土壤有机碳SOC(soil organic carbon)采用重铬酸钾容量法测定;土壤全氮TN(soil total nitrogen)采用凯氏定氮法测定;土壤矿质态氮(NH_4^+ -N和 NO_3^- -N)采用KCl溶液浸取新鲜土样、采用连续流动分析仪测定^[14-15]。

土壤微生物量利用氯仿熏蒸浸提法进行处理并利用Multi N/C 3100 TOC分析仪测定,土壤微生物量碳(C_{mic} ,mg/kg)和土壤微生物量氮(N_{mic} ,mg/kg)分别用下式^[16-17]求得:

$$C_{\text{mic}} = \frac{E_C}{0.45}$$

$$N_{\text{mic}} = \frac{E_N}{0.45}$$

式中: E_C 、 E_N 分别代表熏蒸和未熏蒸浸提液中土壤有机碳和全氮的差值,0.45为校正系数。

1.5 数据处理

实验数据经Excel 2013初步整理分析后,采用SPSS19.0软件进行单因子方差分析(one-way ANOVA)及Pearson相关性分析,多重比较采用

Post-hoc LSD检验,显著水平设定为 $P < 0.05$ 。以火烧强度和土层深度作为处理因子分别对土壤微生物特征进行双因素方差分析,多重比较采用S-N-K法。采用SigmaPlot10.0软件进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同火烧强度下土壤理化性质特征

表2为不同火烧强度后不同土层内土壤理化性质的变化及土壤理化性质在不同火烧强度、不同土层以及两者交互作用下变化情况的显著性检验。可以看出,火烧强度、土层深度及二者的交互作用对土壤有机碳、全氮、铵态氮(NH_4^+ -N)、硝态氮(NO_3^- -N)均有显著影响($P < 0.05$),对于土壤pH值,仅火烧强度对其影响显著。

由表2可以看出,土壤SOC和TN主要集中在0~10cm土层,随土层加深呈逐渐减少的趋势。重度火烧造成土壤SOC含量显著降低,而中度火烧和轻度火烧对土壤SOC影响不明显。各土层土壤TN含量均表现为重度火烧<中度火烧<轻度火烧<对照,其中重度与中度火烧迹地TN含量显著低于对照。重度火烧造成0~10cm、10~20cm土层处 NH_4^+ -N与 NO_3^- -N含量的显著降低($P < 0.05$),而在20~30cm土层处,不同火烧强度间 NH_4^+ -N与 NO_3^- -N含量没有显著差异。火烧对土壤pH的影响主要体现在0~10cm土层,重度火烧后0~10cm

表 2 土壤理化性质特征
Tab. 2 Soil physiochemical properties

指标 Index	土层 Soil layer/cm	火烧强度 Fire severity					Sig.		
							火烧强度(I)	土层(II)	
		H	M	L	C	Fire severity (I)	Soil layer (II)	I × II	
土壤有机碳 Soil organic carbon (SOC) / (g · kg ⁻¹)	0 ~ 10 10 ~ 20 20 ~ 30	9.19 ± 0.09 Ab 4.00 ± 0.49 Bb 2.15 ± 0.39 Cc	17.13 ± 0.76 Aa 6.91 ± 0.59 Ba 5.04 ± 0.08 Cb	17.46 ± 1.23 Aa 7.39 ± 1.18 Ba 4.81 ± 0.74 Cb	16.16 ± 0.55 Aa 7.92 ± 0.44 Ba 6.75 ± 1.22 Ba	< 0.01	< 0.01	< 0.01	
全氮 Soil total nitrogen (TN) / (g · kg ⁻¹)	0 ~ 10 10 ~ 20 20 ~ 30	0.31 ± 0.01 Ac 0.18 ± 0.01 Bd 0.10 ± 0.03 Bd	0.56 ± 0.04 Ab 0.27 ± 0.04 Bc 0.23 ± 0.01 Bc	0.85 ± 0.03 Aa 0.40 ± 0.01 Bb 0.28 ± 0.01 Cb	0.88 ± 0.05 Aa 0.66 ± 0.04 Ba 0.54 ± 0.05 Ca	< 0.01	< 0.01	< 0.01	
铵态氮 NH ₄ ⁺ -N / (mg · kg ⁻¹)	0 ~ 10 10 ~ 20 20 ~ 30	1.72 ± 0.03 Bc 1.25 ± 0.30 Cc 15.10 ± 0.14 Aa	1.45 ± 0.37 Bc 3.01 ± 0.68 Bc 16.75 ± 1.16 Aa	3.70 ± 0.62 Cb 11.78 ± 0.67 Bb 16.32 ± 1.07 Ba	19.49 ± 0.90 Aa 16.32 ± 1.07 Ba 15.85 ± 0.89 Ba	< 0.01	< 0.01	< 0.01	
硝态氮 NO ₃ ⁻ -N / (mg · kg ⁻¹)	0 ~ 10 10 ~ 20 20 ~ 30	1.64 ± 0.43 Bb 2.10 ± 0.62 ABb 3.10 ± 0.58 Aa	2.45 ± 0.84 ABa 2.10 ± 0.44 Bb 3.23 ± 0.18 Aa	3.56 ± 0.36 Aa 3.87 ± 0.72 Aa 3.39 ± 0.21 Aa	2.64 ± 0.06 Aa 3.16 ± 0.54 Aa 2.81 ± 0.11 Aa	< 0.01	0.03	0.02	
pH	0 ~ 10 10 ~ 20 20 ~ 30	6.90 ± 0.27 Aa 6.19 ± 0.03 Ba 6.27 ± 0.15 Ba	6.13 ± 0.12 Ab 5.67 ± 0.14 Ba 5.73 ± 0.05 Ba	5.68 ± 0.38 Ab 5.62 ± 0.49 Aa 5.87 ± 0.33 Aa	5.65 ± 0.25 Ab 5.61 ± 0.44 Aa 5.86 ± 0.64 Aa	< 0.01	0.43	0.73	

注: 数据为平均值 ± 标准差。不同大写字母表示同一样地不同土层之间差异显著 ($P < 0.05$) , 不同小写字母表示不同样地同一土层之间差异显著 ($P < 0.05$) 。下同。 Notes: different capital letters mean significant difference in different soil layers of the same sample plot at $P < 0.05$ level, different lowercase letters mean significant difference in the same soil layer of different sample plots at $P < 0.05$ level. The same below.

土层土壤 pH 显著升高 ($P < 0.05$) , 中度与轻度火烧后土壤 pH 呈上升趋势, 但差异并不显著。

2.2 不同火烧强度下土壤微生物量碳含量变化特征

对不同火烧强度和土层下土壤微生物量碳 (C_{mic}) 含量进行双因素方差分析, 详见表 3。从表 3 可以看出, 火烧强度、土层及二者的交互作用对土壤 C_{mic} 含量的影响均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。不同火烧强度下土壤 C_{mic} 含量为 34 ~ 205 mg/kg (图 1) , 在土壤垂直剖面上随着土层深度的加深, 土壤 C_{mic} 含量显著减少。0 ~ 10 cm 层的 C_{mic} 含量与对照相比, 中度与轻度火烧后土壤 C_{mic} 含量变化不明显, 而重度火烧则造成土壤 C_{mic} 含量显著减少 ($P < 0.05$) ; 10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm 层土壤 C_{mic} 含量变化情况为对照 > 轻度火烧 > 重度火烧 > 中度火烧, 其中, 10 ~ 20 cm 土层中轻度火烧林地与对照无显著差异, 而 20 ~ 30 cm 土层中轻度火烧林地与对照差

异显著。重度火烧与中度火烧林地与对照均有显著性差异 ($P < 0.05$)。整体来看, 不同强度火烧后土壤 C_{mic} 含量呈下降的趋势。

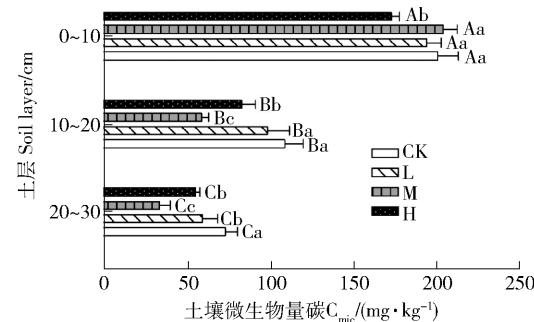


图 1 不同火烧强度下土壤微生物量碳

Fig. 1 Soil microbial biomass C after different fire intensities

2.3 不同火烧强度下土壤微生物量氮含量变化特征

对不同火烧强度和土层下土壤 N_{mic} 含量进行双因素方差分析 (表 4)。从表 4 可以看出, 火烧强度、土层及二者的交互作用对土壤 N_{mic} 含量的影响均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。不同火烧强度下土壤 N_{mic} 含量为 7 ~ 40 mg/kg (图 2) , N_{mic} 含量在土壤垂直剖面上的变化规律与 C_{mic} 大致相同, 即随着土层深度的增加 N_{mic} 含量逐渐减小。0 ~ 10 cm 层的 N_{mic} 含量与对照相比, 不同强度火烧均造成土壤 N_{mic} 含量

表 3 火烧强度和土层对土壤 C_{mic} 含量的影响

Tab. 3 Effects of fire severity and soil layer on soil C_{mic}

变异来源 Source of variation	F	Sig.
火烧强度 Fire intensity	20.32	< 0.01
土层 Soil layer	824.27	< 0.01
火烧强度 × 土层 Fire intensity × soil layer	8.32	< 0.01

量显著降低($P < 0.05$)。10~20 cm 层中土壤 N_{mic} 含量为对照 > 重度火烧 > 轻度火烧 > 中度火烧,除中度火烧外,重度与轻度火烧对 10~20 cm 层土壤 N_{mic} 含量没有显著影响。20~30 cm 层土壤 N_{mic} 含量为对照 > 轻度火烧 > 重度火烧 > 中度火烧,除轻度火烧外,重度与中度火烧均造成 20~30 cm 层土壤 N_{mic} 含量显著减少($P < 0.05$)。整体来看,不同强度火烧后土壤 N_{mic} 含量均呈下降趋势。

表 4 火烧强度和土层对土壤 N_{mic} 含量的影响

Tab. 4 Effects of fire intensity and soil layer on soil N_{mic}

变异来源	Source of variation	F	Sig.
火烧强度	Fire intensity	22.32	<0.01
土层	Soil layer	232.85	<0.01
火烧强度 × 土层	Fire intensity × soil layer	9.75	<0.01

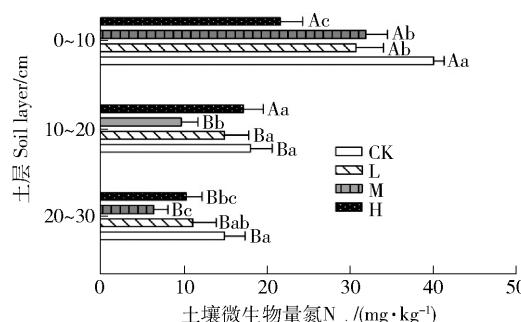


图 2 不同火烧强度下土壤微生物量氮

Fig. 2 Soil microbial biomass N under different fire intensities

2.4 不同火烧强度下土壤微生物量碳氮比值的变化

图 3 表示不同强度火烧后土壤 C_{mic}/N_{mic} 的变化情况。从图 3 可以看出火烧造成 0~10 cm、10~20 cm 两层土壤微生物群落结构发生改变,与对照相比,0~10 cm 土层火烧后 C_{mic}/N_{mic} 均显著升高,变化

范围为 5.0~8.1;在 10~20 cm 土层,仅重度火烧造成 C_{mic}/N_{mic} 显著下降,中度与轻度火烧对 C_{mic}/N_{mic} 没有显著影响,变化范围为 4.8~6.1;在 20~30 cm 土层,火烧对 C_{mic}/N_{mic} 均没有显著影响,变化范围为 4.9~5.6。火烧对各土层 C_{mic}/N_{mic} 的影响没有统一规律,整体处于 5~6 的范围之间。

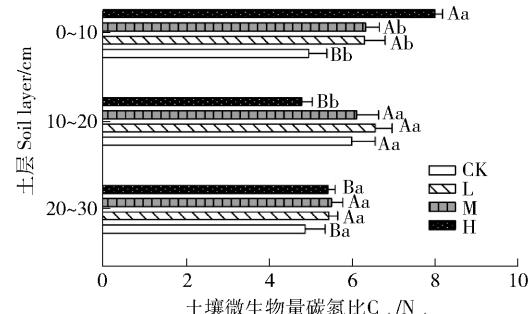


图 3 不同火烧强度下土壤微生物量碳/氮

Fig. 3 Soil microbial biomass C/N under different fire intensities

2.5 土壤微生物量碳、氮与土壤理化性质的关系

Pearson 相关性分析表明,土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 分别与 SOC 及 TN 呈极显著正相关($P < 0.01$),土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 与 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 及 pH 相关关系均不显著($P > 0.05$)(表 5)。

2.6 影响土壤微生物量碳、氮因子的主成分分析

环境因子对土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 的影响不仅是单独的,还可能存在一定的交互作用。为降低各环境因子间的多重共线性干扰,对其进行主成分分析,进一步明确单个因子的影响程度。结果显示,前 2 个主成分的特征值 > 1 ,其累计方差贡献率为 73.459%,基本能反映不同环境因子对土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 影响的大部分信息。

由表 6 可知,第 1 主成分中土壤 SOC、TN 的因子载荷较高,土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 在很大程度上取决于土

表 5 火后土壤微生物量碳、氮与土壤理化性质间的相关系数

Tab. 5 Spearman correlation coefficients between sC_{mic} 、 N_{mic} and soil physiochemical characteristics

	C_{mic}	N_{mic}	C_{mic}/N_{mic}	SOC	TN	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	pH
C_{mic}	1.000	0.930 **	0.306	0.905 **	0.721 **	-0.336	-0.188	0.024
N_{mic}		1.000	-0.026	0.884 **	0.787 **	-0.156	-0.166	-0.033
C_{mic}/N_{mic}			1.000	0.186	-0.005	-0.382	-0.072	0.058
SOC				1.000	0.831 **	-0.254	-0.037	-0.134
TN					1.000	0.140	0.183	-0.351 *
NH_4^+ -N						1.000	0.458 **	-0.291
NO_3^- -N							1.000	-0.254
pH								1.000

注: * 表示相关性达到 $P < 0.05$ 的显著水平, ** 表示相关性达到 $P < 0.01$ 的极显著水平。Notes: * means correlation is significant at $P < 0.05$ level, ** means correlation is extremely significant at $P < 0.01$ level.

壤 SOC 和 TN 的含量,因此可以认为第 1 主成分是土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 来源对其影响效应的反映。第 2 主成分中 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 的因子载荷较高,可以认为第 2 主成分是土壤养分对土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 影响的反映。两个主成分中,第 1 主成分的方差贡献率最大,占总信息量的 40.487%,因此土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 来源是影响火烧后土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 的主要因子,这一结果与相关性分析大致相同。

表 6 土壤因子主成分载荷矩阵及贡献率

Tab. 6 Principal component loading matrix and contribution rate for soil factors

因子 Factor	主成分 Principal component	
	1	2
SOC	0.735	-0.633
TN	0.921	-0.275
NH_4^+ -N	0.304	0.798
NO_3^- -N	0.424	0.652
pH	-0.603	-0.333
特征值 Eigenvalue	2.024	1.649
贡献率 Contribution rate/%	40.487	32.972
累计贡献率	40.487	73.459
Accumulative contribution rate/%		

3 讨 论

不同强度火烧对土壤环境的影响具有一定的差异性。火烧过程中森林土壤最直观的变化是土壤有机碳(SOC)的丧失^[4],许多研究表明,低强度的火烧对 SOC 的影响并不明显,随着火强度的增加,SOC 损失加剧^[18-19]。本研究中 SOC 在中度火烧、轻度火烧与对照样地间差异不显著,而重度火烧过后,SOC 含量显著减少,这主要是因为火烧造成的 SOC 燃烧或挥发的结果。就火烧后土壤全氮(TN)含量的变化,目前还没有统一的结论^[7]。本研究中,火烧后土壤 TN 含量低于对照样地,可能是由于火烧后地上植被量减少,凋落物的输入和根的周转速率下降,从而导致土壤 TN 含量降低^[20]。铵态氮和硝态氮是土壤中能被植物直接吸收的氮的主要形态,被称为土壤有效氮。以往研究表明,火烧会在短时间内增加土壤有效氮的含量,因为一定程度的火烧会将土壤有机氮转为无机形式,火烧后产生的灰分是土壤有效氮增加的主要来源^[4]。而本研究结果表明,火烧半年后平泉地区油松林 0~20 cm 土层有效氮含量显著降低,这可能是因为研究区降雨主要集中在夏季(8月份降雨量占 70%),而本次试验采样是在 10 月份,经过降雨期后,在雨水的作用下土壤有效

氮极易被淋溶流失,含量迅速降低。另外,火烧后植株体受到不同程度的损伤,其根系分泌物减少,对土壤有效氮的固持能力减弱,这也是土壤有效氮减少的一个主要原因^[21]。火烧后土壤 pH 值通常会升高,一般随着火强度的增加而上升^[22]。本研究中,不同强度火烧后土壤 pH 均高于对照林地,且火烧强度越大,土壤 pH 提高越大,重度火烧后 0~10 cm 土层 pH 值提高最显著,该结果与胡海清等^[23]和谷会岩等^[24]研究一致。这可能是由于不同强度火烧对地表枯落物的氧化作用不同,较高强度的火烧加大表层枯落物氧化对有机酸的消耗,及火烧后残留的灰分中可溶性盐基和阳离子的增加,影响了 pH 值的变化。不同强度火烧后,土壤 pH 值的恢复情况也存在差异,低、中强度火烧后土壤的 pH 恢复较快,而重度火烧后土壤的 pH 恢复的较慢^[25]。本研究中火烧半年后重度火烧土壤 pH 值显著大于对照,仍处在火烧恢复期。

众多研究表明,火烧对表层土壤微生物量影响显著,而对深层(20 cm 以下)的土壤微生物群落结构影响不显著。Prieto 等^[26]研究发现,火烧后土壤表层微生物量碳、氮明显下降。洪伟等^[27]对福建省杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林和马尾松(*Pinus massoniana*)林火烧后土壤微生物量变化研究发现,表层土壤微生物量受火烧影响明显,深层的影响不大。Hamman 等^[12]对美国科罗拉多州海曼岛不同强度过火后土壤微生物变化研究发现,火强度对改变土壤微生物生物量没有明显影响。本研究测定了不同强度火烧后油松林地土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 含量的变化。整体来看,不同火烧强度间土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 均随着土层深度增加而减少,不同土层间土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 在火烧后均有下降的趋势(图 1、2)。这可能是由于,一方面,不同土层土壤环境不同,土壤微生物量在不同土层的分布存在差异;另一方面,火烧直接杀死土壤微生物,或通过改变土壤理化性质从而对土壤微生物量产生影响。值得注意的是,本研究中 20~30 cm 土层处不同火烧强度间土壤有机质、全氮以及土壤微生物量存在显著差异,这可能是由于火烧改变了地上植被的郁闭度和林分密度,造成林内的光热条件以及对雨水的截留作用发生改变,进而对土壤养分含量产生影响。如张洪亮等^[28]对不同郁闭度天然云杉(*Picea schrenkiana*)林立地土壤养分研究发现各郁闭度 20~30 cm 土层的土壤速效养分存在显著差异,这主要是在降雨和淋溶的作用下,养分经冲刷、流失后,再聚集和分配的结果。陈莉莉等^[29]对不同林分密度下松(*Pinus sp.*)栎(*Quercus sp.*)混交林土壤水分理化性质研究发现,

20~40 cm 土壤有机质质量分数与林分密度显著相关。通过以上学者的观点我们初步推测造成火烧半年后 20~30 cm 土层处土壤有机质、全氮、土壤微生物量碳氮发生差异的原因可能是地上植被群落结构差异所造成的。Stephen 等^[3]认为火烧后随着时间的推移植被群落结构的变化会对土壤微生物的驱动和塑造产生重要影响,这为我们以后加深火烧对土壤微生物量的影响提供了一个参考方向。

相关性分析显示火烧后土壤微生物量碳、氮变化与土壤 SOC 及 TN 极显著相关 ($P < 0.01$)。主成分分析进一步证明土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 来源是影响火烧后土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 变化的主要因子,这与大多数研究结论相一致^[23],表明 SOC、TN 是影响本研究区土壤微生物量碳氮变化的主要因素。Saetre 等^[30]曾指出森林土壤中微生物群落结构和功能的差异主要与土壤有机碳的数量和质量有关,土壤中碳、氮元素的含量及可利用性会直接影响土壤微生物的正常生长和活性,从而限制土壤微生物量的大小。土壤微生物量碳、氮比可以反映土壤微生物的群落结构,一般情况下,细菌的碳氮比在 5:1 左右,放线菌在 6:1 左右,真菌在 10:1 左右^[31]。本研究结果显示,火烧造成土壤 0~20 cm 土层微生物群落的改变,且以重度火烧尤为明显。0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm 土层 C_{mic}/N_{mic} 分别处于 5.0~8.1、4.8~6.1、4.9~5.6,整体处于 5~6 之间,说明土壤中的微生物类群主要为细菌和放线菌。这主要是由两方面原因所造成的:一方面是与真菌相比,细菌更加耐热,细菌在干土和湿土的 100% 致死温度均比真菌高 40 ℃,火烧后细菌的恢复速度较快^[32]。另一方面,火烧造成土壤环境的改变,会对细菌和真菌的恢复产生不同影响,如火烧造成土壤有机酸的变性,使土壤 pH 值升高。Blagodatskaya 等^[33]研究发现,土壤 pH 值升高是造成火烧后真菌与细菌比率下降的主要原因。

4 结 论

1) 火烧半年后,不同强度火烧区各土层 C_{mic} 、 N_{mic} 含量均发生降低,火烧造成土壤 0~10 cm、10~20 cm 两层 C_{mic}/N_{mic} 发生改变。双因素方差分析显示,火烧强度、土层深度及二者的交互作用对 C_{mic} 和 N_{mic} 的影响均达到极显著水平 ($P < 0.01$)。

2) 重度火烧造成土壤 SOC、TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量显著降低,火烧后土壤含水率下降,但重度火烧区 0~10 cm 土层土壤含水率显著高于对照,火烧后土壤 pH 值呈上升趋势。

3) 火烧后土壤理化性质的改变是影响土壤

C_{mic} 、 N_{mic} 含量的重要因素,土壤 SOC、TN 对土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 含量有极显著影响 ($P < 0.01$),土壤含水率对土壤 C_{mic} 有显著影响 ($P < 0.05$),土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 含量与土壤 SOC、TN、含水率均呈正相关。主成分分析进一步表明土壤 SOC、TN 是影响土壤 C_{mic} 、 N_{mic} 的主要因素。

参 考 文 献

- [1] 吴然,康峰峰,韩海荣,等.山西太岳山典型植被类型土壤微生物量特征 [J].应用与环境生物学报,2016,22(3):486~493.
- WU R, KANG F F, HAN H R, et al. Soil microbial biomass properties under typical vegetation types in the Taiyue Mountain of China [J]. Chinese Journal Applied Environmental Biology, 2016, 22(3): 486~493.
- [2] JENKINSON D S. Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil [G] // Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems. London: CABI, 1988:368~386.
- [3] STEPHEN C H, THOMAS H D, GREGORY S N, et al. Post-fire vegetative dynamics as drivers of microbial community structure and function in forest soils [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 220:166~184.
- [4] CERTINI G. Effects of fire on properties of forest soils: a review [J]. Oecologia, 2005, 143: 1~10.
- [5] FIERRO A, RUTIGLIANO F A, MARCO A D, et al. Post-fire stimulation of soil biogenic emission of CO_2 in a sandy soil of a Mediterranean shrubland [J]. International Journal of Wildland Fire, 2007, 16(5):573~583.
- [6] MABUHAY J A, NAKAGOSHI N, ISAGI Y. Soil microbial biomass, abundance, and diversity in a Japanese red pine forest: first year after fire [J]. Journal of Forest Research, 2006, 11(3): 165~173.
- [7] 赵彬,孙龙举,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.
- ZHAO B, SUN L J, HU H Q, et al. Post-fire soil microbial biomass and nutrient content of *Larix gmelinii* forest in autumn [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(3):450~459.
- [8] 罗菊春.大兴安岭森林火灾对森林生态系统的影响 [J].北京林业大学学报,2002,24(5/6):101~107.
- LUO J C. Influence of forest fire disaster on forest ecosystem in Great Xing'anling [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002, 24(5/6):101~107.
- [9] 李国雷,刘勇,李瑞生,等.油松人工林土壤质量的演变 [J].林业科学,2008,44(9):76~81.
- LI G L, LIU Y, LI R S, et al. Change of soil quality affected by forest age of *Pinus tabuliformis* plantations [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2008, 44(9):76~81.
- [10] 张钢民,冯天杰,杨文利,等.大窝铺林区种子植物区系的初步研究 [J].河北林果研究,2000,15(3):201~206.
- ZHANG G M, FENG T J, YANG W L, et al. A preliminary study on flora of seed plants in Dawopu Forest Zone [J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2000, 15(3):201~206.
- [11] 赵伟红,康峰峰,韩海荣,等.冀北辽河源地区不同林龄油松天然次生林土壤理化特征的研究 [J].西北林学院学报,2014,

- 29(3):1-8.
- ZHAO W H, KANG F F, HAN H R, et al. Physicochemical properties of the soils of *Pinus tabuliformis* natural secondary stands with different ages in Liaoheyuan Area of northern Hebei [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3):1-8.
- [12] HAMMAN S T, BURKE I C, STROMBERGER M E. Relationships between microbial community structure and soil environmental conditions in a recently burned system [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(7):1703-1711.
- [13] 郑琼, 崔晓阳, 邸雪颖, 等. 不同林火强度对大兴安岭堰松林土壤微生物功能多样性的影响 [J]. 林业科学, 2012, 48(5):95-100.
- ZHENG Q, CUI X Y, DI X Y, et al. Effects of different forest fire intensities on microbial community functional diversity in forest soil in Daxing'anling [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(5):95-100.
- [14] CROOKE W M, SIMPSON W. Determination of ammonium in Kjeldahl digests of crops by an automated procedure [J]. Journal of the Science of food and Agriculture, 1971, 22:9-10.
- [15] BEST E X. An automated method for determining nitrate-N in soil extracts [J]. Queensland Agricultural Journal, 1976, 33:161-165.
- [16] WU J, JOERGENSEN R, POMMERENING B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: an automated procedure [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22: 1167-1169.
- [17] JOERGENSEN R G, BROOKES P C. Ninhydrin-reactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0.5 m K_2SO_4 soil extracts [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(8):1023-1027.
- [18] 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, 255:2555-2565.
- [19] GIOVANNINI G, LUCCHESI S, GIACHETTI M. Effects of heating on some physical and chemical parameters related to soil aggregation and erodibility [J]. Soil Science, 1988, 146:255-261.
- [20] 孙毓鑫, 吴建平, 周丽霞, 等. 广东鹤山火烧迹地植被恢复后土壤养分含量变化 [J]. 应用生态学报, 2009, 20(3):513-517.
- SUN M X, WU J P, ZHOU L X, et al. Changes of soil nutrient contents after prescribed burning of forestland in Heshan City, Guangdong Province [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(3):513-517.
- [21] 林宝平, 何宗明, 鄒士垒, 等. 林火干扰对滨海沙地人工林土壤碳氮库的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(5):780-786.
- LIN B P, HE Z M, GAO S L, et al. Effects of fire disturbance on soil carbon and nitrogen pools in coastal sandy plantation forests [J]. Chinese Journal Applied Environmental Biology, 2016, 22(5):780-786.
- [22] DYRNES C T, VAN C K, LEVISON J D. The effect of wildfire on soil chemistry in four forest types in interior Alaska [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1989, 19(11): 1389-1396.
- [23] 胡海清, 李莹, 张冉, 等. 火干扰对小兴安岭两种典型林型土壤养分和土壤微生物生物量的影响 [J]. 植物研究, 2015, 35(1):101-109.
- HU H Q, LI Y, ZHANG R, et al. Effect of fire disturbance on nutrient content and soil microbial biomass of two forest types [J]. Bulletin of Botanical Research, 2015, 35(1):101-109.
- [24] 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.
- GU H Y, JIN J B, CHEN X W, et al. The long-term impacts on chemical properties of *Larix gmelinii* forest on the northern slope of Greater Hinggan Mountains from a forest fire of varying fire intensity [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(7):1114-1121.
- [25] 张敏, 胡海清. 林火对土壤微生物的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2002, 30(4):44-46.
- ZHANG M, HU H Q. The effect of forest fire on microorganism in soil [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2002, 30(4): 44-46.
- [26] PRIETO F, ACEA M J, CARBALLAS T. Soil microbial and extractable C and N after wildfire [J]. Biology and Fertility of Soil, 1998, 27: 132-142.
- [27] 洪伟, 俞新玲, 林勇明, 等. 火灾对森林土壤微生物数量特征的影响 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2010, 39(3): 251-256.
- HONG W, YU X L, LIN Y M, et al. Analysis on the effect of fire on quantitative characteristics of forest soil microorganisms [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2010, 39(3):251-256.
- [28] 张洪亮, 朱建雯, 张新平, 等. 天山中部不同郁闭度天然云杉林立地土壤养分的比较研究 [J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33(1): 15-18.
- ZHANG H L, ZHU J W, ZHANG X P, et al. Study on soil nutrient condition of natural spruce forest of different canopy density in center Tianshan [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2010, 33(1): 15-18.
- [29] 陈莉莉, 王得祥, 于飞, 等. 林分密度对土壤水分理化性质的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(8): 61-64.
- CHEN L L, WANG D X, YU F, et al. Effects of stand density on physical and chemical properties of soil moisture [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2013, 41(8): 61-64.
- [30] SAETRE P, BAATH E. Spatial variation and patterns of soil microbial community structure in a mixed spruce-birch stand [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(7):909-917.
- [31] DIAZRAVINA M, ACEA M J, CARBALLAS T. Seasonal changes in microbial biomass and nutrient flush in forest soils [J]. Biology and Fertility of Soils, 1995, 19(2): 220-226.
- [32] CHOROMANSKA U, DELUCA T H. Microbial activity and nitrogen mineralization in forest mineral soils following heating: evaluation of post-fire effects [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(2):263-271.
- [33] BLAGODATSKAYA E V, ANDERSON T H. Interactive effects of pH and substrate quality on the fungal-to-bacterial ratio and QCO₂ of microbial communities in forest soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1998, 30(11):1269-1274.

(责任编辑 赵 勃
责任编委 赵秀海)