

DOI: 10.5846/stxb201803050427

王玉哲¹, 刘俊第², 严 强³, 方 熊², 易志刚², 胡亚林¹, 刘 先^{1,*}

Wang Y Z, Liu J D, Yan Q, Fang X, Yi Z G, Hu Y L, Liu X. Effects of black carbon on soil labile carbon and nitrogen pools in a *Pinus massoniana* plantation subjected to slash burning. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): - .

马尾松林采伐迹地火烧黑炭对土壤活性碳氮库的影响

王玉哲¹, 刘俊第², 严 强³, 方 熊², 易志刚², 胡亚林¹, 刘 先^{1,*}

1 福建农林大学林学院, 福州 350002

2 福建农林大学资源与环境学院, 福州 350002

3 福建农林大学西芹教学林场, 南平 353000

摘要: 黑炭是火烧过程中不完全燃烧的产物, 在火烧迹地的分布具有异质性。为了解黑炭输入量对土壤活性碳氮库的影响, 选取中亚热带 33 年生马尾松人工林采伐迹地为研究对象, 对比炼山 1 年后移除 (B0)、单倍 (B1) 和双倍黑炭输入 (B2) 处理和未火烧对照土壤可溶性有机碳氮含量 (DOC 和 DON)、矿质氮、土壤微生物量碳氮含量 (MBC 和 MBN) 之间的差异。结果表明: 炼山对土壤 DOC 和 DON 含量的影响因土层而异, 在 0—10 cm 土层, 火烧土壤 DOC 和 DON 含量与对照土壤没有显著差异, 而在 10—20 cm 土壤要显著低于对照土壤 ($P < 0.05$)。火烧土壤矿质氮、土壤 MBC 和 MBN 含量均低于对照土壤, 但差异未达到显著性水平 ($P > 0.05$)。火烧土壤含水率、pH、全碳和全氮、铵态氮、土壤 MBN 含量均与黑炭输入量成正比, 特别是在 10—20 cm 土层, B2 处理土壤铵态氮含量显著高于 B0 和 B1 处理 ($P < 0.05$)。对于土壤 MBN, 黑炭输入处理 (B1 和 B2) 火烧土壤 MBN 含量与对照土壤没有显著差异, 而去除黑炭处理 (B0) 火烧土壤 MBN 含量则显著低于对照土壤 ($P < 0.05$)。结果说明黑炭输入对火烧土壤的微生物群落恢复和 N 素保持具有积极意义, 因此亚热带人工林管理过程中应重视黑炭的利用。未来研究应继续关注火后土壤活性碳氮库和微生物群落特征的时空变化特征, 并从 N 转化功能微生物角度深入探讨黑炭对火烧土壤 N 素循环的影响机理。

关键词: 炼山; 黑炭; 土壤可溶性有机碳氮; 土壤矿质氮; 土壤微生物量碳氮

Effects of black carbon on soil labile carbon and nitrogen pools in a *Pinus massoniana* plantation subjected to slash burning

WANG Yuzhe¹, LIU Jundi², YAN Qiang³, FANG Xiong², YI Zhigang², HU Yalin¹, LIU Xian^{1,*}

1 Forestry College of Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 College of Resource and Environmental Science of Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

3 Xiqin Research Forest of Fujian Agriculture and Forestry University, Nanping 353000, China

Abstract: Slash and burn is a traditional and efficient way of removing forest harvest residues in south China. This study was conducted to investigate the effects of fire-derived black carbon on soil labile carbon and nitrogen pools in a *Pinus massoniana* Lamb. plantation in subtropical China. Three levels of black carbon [nil (B0), single (B1), and double rates (B2)] were used by transferring black carbon across the plots after slash burning. The unburnt area (UB) adjacent to the burnt site was selected as the reference site. Soil dissolved organic C (DOC) and N (DON), inorganic N, microbial biomass C (MBC), and N (MBN) contents were measured 1 year after the black carbon application. The results showed that the effects of fire on the soil DOC and DON differed among the sampling depths, and no significant differences in soil DOC and DON contents between the burnt and reference soil were observed at the 0—10 cm depth, whereas the DOC and

基金项目: 福建省教育厅中青年教师教育科研项目 (JAT170189); 国家自然科学基金项目 (31700378, 41603081)

收稿日期: 2018-03-05; 修订日期: 2018-07-30

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xianliu@fafu.edu.cn

DON contents in 10—20 cm soil layers were significantly lower at the burnt site than they were at the reference site ($P < 0.05$). The soil inorganic N, MBC, and MBN contents were lower at the burnt site than those at the reference site were, although the differences were not statistically significant ($P > 0.05$). Soil moisture content, pH, total C, total N, ammonium, and soil MBN content increased with the amount of black carbon input. Especially, the soil ammonium content under the B2 treatment was significantly higher than those under B0 and B1 treatments were at the 10—20 cm depth ($P < 0.05$). Moreover, the removal of black carbon significantly decreased the soil MBN content compared to that of the reference site. In conclusion, this study suggested that the black carbon input played a key role in the recovery of soil microbial communities and N retention after slash burning, and the underlying mechanisms by which black carbon regulates soil N cycling should be investigated in future studies.

Key Words: slash burning; black carbon; soil dissolved organic carbon and nitrogen, soil mineral nitrogen, soil microbial biomass carbon and nitrogen

林火是全球森林生态系统一个不可忽视的干扰因子^[1-2],在全球气候变化的背景下,林火发生的频率和强度将会增加。在我国南方,炼山是林火的一种,也是一项重要的森林经营措施,不但可以经济、快速和有效地清除森林采伐剩余物,还能抑制植物病害的蔓延^[3]。虽然炼山会导致环境污染,增加土壤中养分流失^[4],但是炼山作为一种传统的森林管理措施一直存在,特别是,在松材线虫(*Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner & Buhner) Nickle)病感染的马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)人工林,炼山仍是控制松材线虫病蔓延的有效措施。

火烧对森林生态系统的碳氮循环有重要影响^[5],一方面燃烧过程可以直接导致有机物质中的碳氮以气态的形式损失,另一方面火烧引起的土壤、植物和微生物性质改变还会对森林生态系统碳氮循环产生间接影响^[6]。黑炭是火烧过程不完全燃烧的产物,不易被微生物降解,可以在土壤中存留几千甚至上万年,对于缓解大气 CO₂浓度的增加具有重要贡献^[7]。火烧产生的黑炭能通过静电吸附作用来增加土壤对铵态氮的保持能力^[8],另一方面在北方森林和干燥温带高山森林的研究表明,添加黑炭能增强土壤净硝化作用,增加土壤硝态氮的累积^[9-10],这在一定程度上增加了氮素淋溶损失的风险。然而,在高温多雨的亚热带地区,黑炭输入对土壤氮转化过程的影响是否相同还有待研究。

土壤活性碳氮库主要包括土壤微生物量碳氮和可溶性有机碳氮,是土壤碳氮库中的活跃组分,具有很高的生物有效性,可作为土壤有机质改变和养分有效性的评价指标^[11-13]。为此,本研究选取福建南平中亚热带 33 年生马尾松人工林采伐迹地,研究了炼山 1 年后不同黑炭输入量处理火烧土壤与未火烧对照土壤理化性质(容重、含水率和 pH)、全碳和全氮、可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)、可溶性有机氮(Dissolved organic nitrogen, DON)、矿质氮、土壤微生物量碳(Soil microbial biomass C, MBC)和土壤微生物量氮(Soil microbial biomass N, MBN)含量差异,并探讨了炼山及其产物黑炭对土壤活性碳氮库的影响机理,旨在为完善炼山管理措施和人工林可持续经营提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于福建省南平市福建农林大学西芹教学林场(26°33' N, 118°6' E),属中亚热带季风气候,海拔 200—500 m,年平均气温 19.4℃,极端最高温为 41℃,最低温度为-5.8℃,年平均降雨量 1817 mm,集中在 5—6 月,7 月常有台风和暴雨,年平均日照 1807.8 h,无霜期 302 d。土壤主要为黄红壤^[14],由母岩风化的残积母质发育而成,土层较厚,超过 1 m。试验样地选取 33 年生马尾松人工林(8 马尾松+1 阔叶树+1 杉木 *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)采伐迹地,采伐时间为 2015 年 10 月,密度为 330 株/hm²,坡度为 25°。林下植被主要有冬青(*Ilex chinensis* Sims)、苦竹(*Pleioblastus amarus* (Keng) Keng)、箬竹(*Indocalamus tessellatus* (Munro) Keng f.)、枇杷叶紫珠(*Callicarpa kochiana* Makino)、粗叶榕(*Ficus hirta* Vahl)、山苍子

(*Litsea cubeba* (Lour.) Pers.)、五节芒 (*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb. ex Schum. et Laut.)、铁芒萁 (*Dicranopteris linearis* (Burm.) Underw.) 等。

1.2 样地设置

于 2016 年 3 月 21 日对采伐迹地进行炼山(图 1),黑炭是炼山过程中采伐剩余物不完全燃烧的产物,在火烧迹地的分布具有异质性,为研究炼山及其产物黑炭对土壤性质的影响,于 2016 年 3 月 27 日(炼山 1 周后)在火烧样地中根据随机区组试验设计,在 4 个区组中设置了 3 个不同黑炭输入量处理,每个小区面积为 100 m^2 ($10\text{ m}\times 10\text{ m}$)。3 个黑炭处理分别为:①对炼山迹地黑炭不做处理(B1);②将炼山后产生的黑炭移出该小区(B0);③将处理 B0 处理小区中移除的黑炭添加到该小区(B2),添加的黑炭在表面均匀铺设,并未对土壤进行人工平整。由于本研究主要探讨不完全燃烧生成的固体组分黑炭对土壤碳氮库的影响(其在土壤中有较长的存留时间),因此 B0 处理中移除的黑炭并不包括粉状黑炭和灰分,在移除过程中尽可能地移出所有块状黑炭。黑炭的基本性质为:pH 7.98 ± 0.03 ,全碳含量($80.1\pm 0.30\%$),全氮含量($0.32\pm 0.02\%$)。同时选择采伐迹地未火烧区域作为对照处理(UB, $n=4$)。2016 年 4 月中旬在火烧迹地 and 对照区域同时进行造林,新造树种为闽楠(*Phoebe bournei* (Hemsl.) Yang),造林方式为 1 年生幼苗移栽,造林密度为 $2505\text{ 株}/\text{hm}^2$ 。



图 1 马尾松人工林采伐迹地炼山前后

Fig.1 Slash burning in a *Pinus massoniana* plantation

1.3 土样采集与分析

于 2017 年 3 月 21 日(炼山 1 年后)进行土壤样品采集,在 3 个黑炭处理样方内按“S”型采样法选 8 个点,采集 0—10 cm 和 10—20 cm 土壤^[15],同时在 4 块未火烧对照处理(UB)区域采集土壤样品,将每个样方土壤混匀后冷藏运回实验室。去除土壤中的石块、根系等杂物后过 2 mm 筛,之后分成 2 份,一份风干用于测定土壤 pH、全碳和全氮含量;另一份在 4℃ 冰箱冷藏,用于土壤 DOC、DON、矿质氮、MBC 和 MBN 含量测定。采用 100 cm^3 环刀取 0—10 cm 和 10—20 cm 土层原状土测定土壤容重。

土壤含水率采用重力法(105°C 烘干 24 h);土壤 pH 按土水比 1:2.5 混合搅拌后用 pH 计测定;土壤全碳和全氮含量采用碳氮元素分析仪(Vario MICRO cube, Elementar, 德国)测定。用 2 mol/L KCl 液浸提土壤后,利用全自动间断化学分析仪(SmartChem200, AMS, 意大利)测定浸提液中的矿质氮(铵态氮和硝态氮)含量,用总有机碳分析仪 TOC-LCPH, Shimadzu, 日本)测定土壤浸提液的 DOC 和可溶性总氮含量,可溶性总氮含量与矿质氮含量的差值即为土壤 DON 含量。土壤微生物量碳氮含量测定采用氯仿熏蒸法:分别称取 2 份 10 g 的土壤样品,其中一份用氯仿熏蒸 24 h,另一份不熏蒸,然后往土壤上加 50 mL 0.5 M K_2SO_4 溶液,震荡 30 min 后过滤,用总有机碳分析仪(TOC-LCPH, Shimadzu, 日本)测定浸提液中的碳氮含量,根据熏蒸和未熏蒸样品的差值计算土壤 MBC 和 MBN 含量,转换系数分别选取 2.64^[16] 和 2.22^[17]。

1.4 数据分析

采用 SPSS 22.0 进行统计分析,通过单因素方差(One-way ANOVA)检验同一土层不同处理土壤理化性质和活性碳氮库的差异,采用最小显著性差异法(Least-Significant Difference, LSD)检验均值之间差异是否显著

($\alpha=0.05$)。采用 Pearson 法分析土壤活性碳氮库与土壤理化性质的相关性。利用 Origin 8.5 软件制图。

2 结果与分析

2.1 土壤基本理化性质

炼山 1 年后,火烧和对照土壤的基本理化性质见表 1。火烧和对照土壤的含水率存在显著差异($P<0.05$),在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层,火烧土壤含水率均低于对照土壤。火烧土壤的 pH 均高于对照土壤,特别是 B2 处理 0—10 cm 土壤 pH 比对照土壤高出 24%($P=0.058$)。炼山对土壤全碳和全氮没有显著影响($P>0.05$),而火烧与对照土壤 C/N 差异因土层而异,在 0—10 cm 土层,双倍黑炭输入量处理土壤 C/N 要显著大于对照土壤($P<0.05$),10—20 cm 土层的火烧和对照土壤 C/N 没有显著差异($P>0.05$)。火烧土壤含水率、pH、全碳和全氮均随着黑炭输入量的增加而增加,但差异均未达到显著性水平($P>0.05$)。

表 1 马尾松林采伐迹地炼山 1 年后土壤基本理化性质 ($n=4$)

Table 1 Soil physiochemical properties in a *Pinus massoniana* plantation subjected to slash burning ($n=4$)

土壤性质 Soil properties	土层 Soil depth/cm	对照 UB Unburnt soil	去除黑炭 B0 Removal of black carbon	单倍黑炭 B1 Single rate of black carbon	双倍黑炭 B2 Double rates black carbon
容重 Bulk density/(g/cm ³)	0—10	1.12±0.05a	1.16±0.04a	1.16±0.07a	1.23±0.03a
	10—20	1.17±0.05a	1.24±0.03a	1.15±0.03a	1.19±0.01a
含水率 Moisture/%	0—10	23.34±1.60a	18.45±1.36b	20.97±1.48ab	21.83±1.68ab
	10—20	27.10±1.10a	21.51±1.29b	21.52±1.22b	21.83±1.85b
pH	0—10	4.24±0.04a	4.58±0.13a	4.69±0.18a	5.28±0.66a
	10—20	4.24±0.02a	4.29±0.06a	4.41±0.06a	4.77±0.41a
全碳 Total C/(g/kg)	0—10	20.69±1.50a	18.81±1.85a	18.93±3.64a	24.65±3.02a
	10—20	14.26±0.65a	12.00±0.55a	13.15±1.87a	14.45±0.53a
全氮 Total N/(g/kg)	0—10	1.58±0.10a	1.35±0.15a	1.38±0.24a	1.56±0.09a
	10—20	1.14±0.03a	1.00±0.06a	1.06±0.15a	1.13±0.07a
碳氮比 C/N	0—10	13.07±0.15b	14.03±0.27ab	13.58±0.28ab	15.78±1.41a
	10—20	12.47±0.32a	12.04±0.29a	12.38±0.21a	12.84±0.48a

数据为均值±标准差;不同字母表示同一土层不同处理之间存在显著差异($P<0.05$)

2.2 土壤可溶性有机碳氮含量

炼山对土壤 DOC 含量的影响因土层而异(图 2),在 0—10 cm 土层,火烧土壤 DOC 含量与对照土壤没有显著差异($P>0.05$),而 10—20 cm 土层的火烧土壤 DOC 含量要显著低于对照土壤($P<0.05$)。同样,炼山对土壤 DON 含量的影响因土层而异(图 2),且与炼山后黑炭输入量有关(图 2)。火烧后单倍(B1)和移除黑炭(B0)处理中,土壤 DON 含量显著低于对照土壤($P<0.05$),而双倍黑炭输入处理(B2)与对照土壤没有显著差异($P>0.05$)。炼山及其黑炭输入量对土壤 DOC/DON 没有显著影响($P>0.05$,图 2)。

2.3 土壤矿质氮含量

土壤矿质氮以硝态氮为主,分别占火烧和对照土壤的 70.82%—95.95%和 48.40%—97.53%(图 3)。土壤铵态氮含量受火烧和黑炭输入量的影响较大,特别是 10—20 cm 下层土壤(图 3),与对照相比,炼山后移除黑炭(B0)显著降低了土壤铵态氮含量,而增加黑炭输入(B2)能显著增加火烧土壤中的铵态氮含量($P<0.05$)。在 0—10 cm 和 10—20 cm 土层中,火烧土壤硝态氮含量均低于对照土壤,但差异未达到显著性水平($P>0.05$)。

2.4 土壤微生物量碳氮含量

炼山 1 年后火烧土壤 MBC 和 MBN 含量均低于对照土壤,且炼山对马尾松人工林采伐迹地土壤 MBN 含量的影响因土层而异(图 4)。在 0—10 cm 土层,炼山后移除黑炭(B0)处理中土壤 MBN 含量显著低于对照

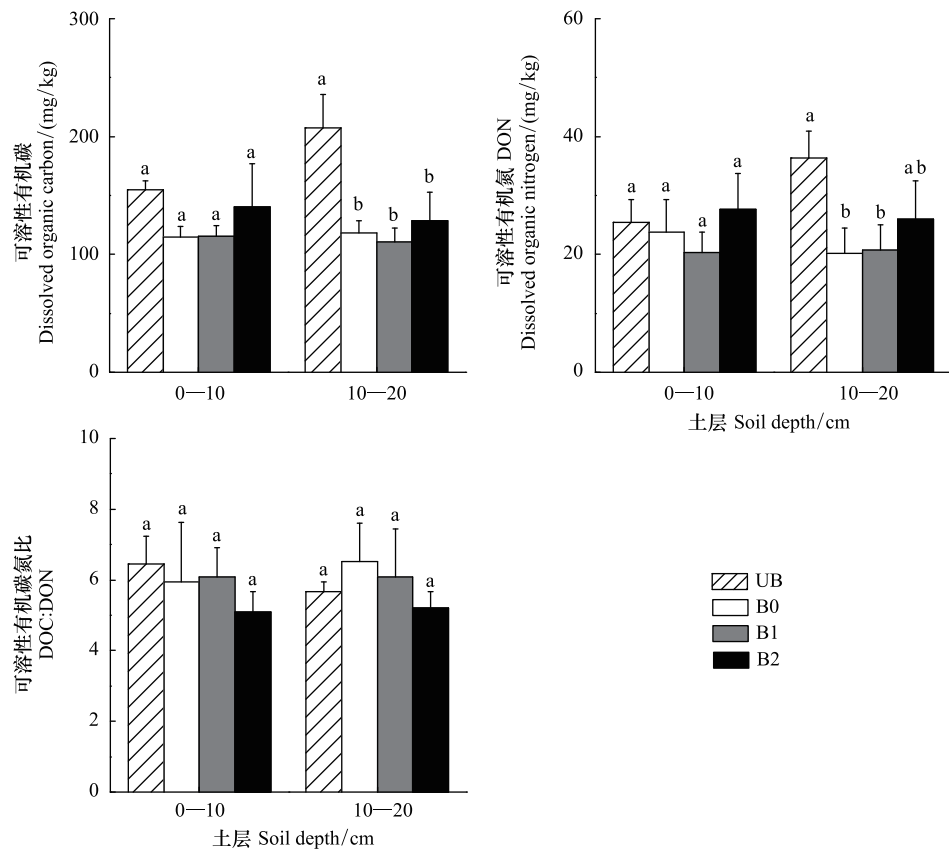


图2 炼山黑炭对土壤可溶性有机碳氮含量的影响

Fig.2 Effects of black carbon on soil dissolved organic carbon and nitrogen contents

UB: 未火烧对照, unburnt soil; B0: 去除黑炭, removal of black carbon; B1: 单倍黑炭, single rate of black carbon; B2: 双倍黑炭, double rates black carbon

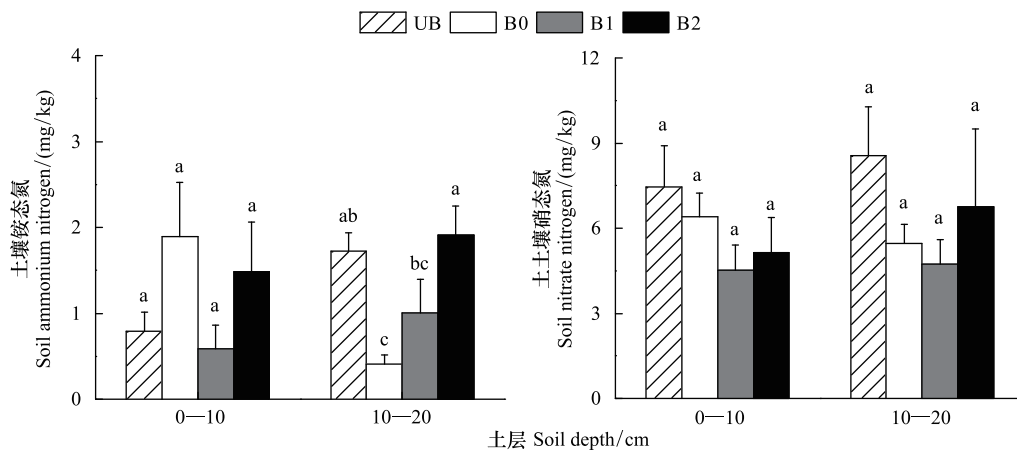


图3 炼山黑炭对土壤矿质氮含量的影响

Fig.3 Effects of black carbon on the contents of soil nitrate and ammonium

土壤 ($P < 0.05$), 而在 10—20 cm 火烧和对照土壤 MBC 和 MBN 含量均未显著差异 ($P > 0.05$)。不同黑炭输入量处理火烧土壤 MBC 和 MBN 含量没有显著差异 ($P > 0.05$), 但随着黑炭输入量的增加而增加 (0—10 cm 土壤 MBC 含量除外, 图 4)。火烧后黑炭输入量能显著影响 0—10 cm 表层土壤的微生物量碳氮比 (MBC/MBN), 移除黑炭处理 (B0) 土壤 MBC/MBN 要显著高于双倍黑炭输入处理 (B2) ($P < 0.05$), 这与土壤 C/N 的

趋势相反(表1)。

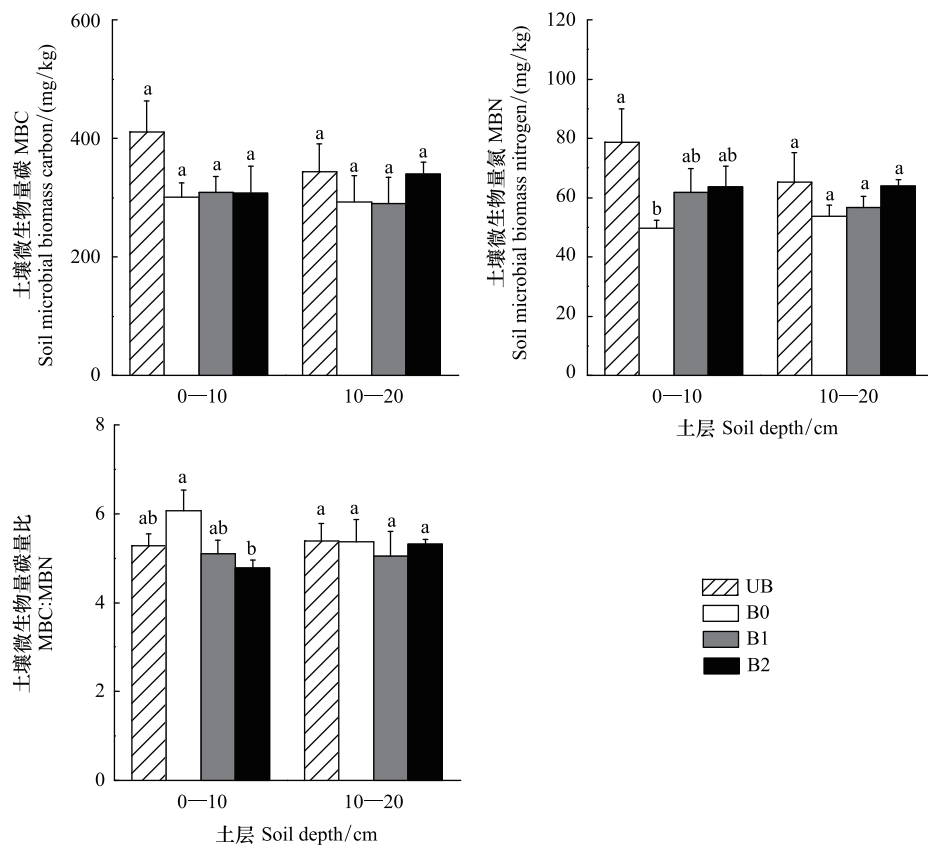


图4 炼山黑炭对土壤微生物量碳氮含量的影响

Fig.4 Effects of black carbon on soil microbial biomass carbon and nitrogen contents

2.5 土壤活性碳氮库与土壤理化性质之间的关系

如表2所示,土壤DOC含量与土壤含水率之间存在显著或极显著的正相关性;0—10 cm土壤硝态氮含量与土壤pH呈负相关,10—20 cm土壤铵态氮含量与全碳呈正相关;0—10 cm土壤MBC和MBN含量与土壤含水率呈极显著的正相关关系,而在10—20 cm下层土壤,土壤MBC和MBN含量与含水率和pH等土壤理化性质不存在显著相关性。

表2 土壤活性碳氮库与土壤理化性质相关性分析

Table 2 Correlation coefficients between soil labile carbon and nitrogen pools and soil physiochemical properties

土层 Soil depth/cm		DOC	DON	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	MBC	MBN
0—10	含水率	0.511 *	0.083	-0.019	-0.060	0.746 **	0.795 **
	pH	-0.013	0.084	0.406	-0.530 *	0.203	0.144
	全碳	0.243	0.059	0.371	-0.017	0.454	0.583 *
	全氮	0.343	0.020	0.169	0.187	0.412	0.588 *
10—20	含水率	0.681 **	0.457	0.247	0.239	0.175	0.230
	pH	-0.419	-0.363	0.400	-0.425	-0.019	-0.010
	全碳	0.147	0.280	0.768 **	0.048	-0.088	0.166
	全氮	0.193	0.303	0.579 *	0.020	-0.178	0.042

* 表示存在显著相关($P < 0.05$), ** 表示存在极显著相关($P < 0.01$); DOC: 可溶性有机碳 Dissolved organic carbon; DON: 可溶性有机氮 Dissolved organic nitrogen; NH₄⁺-N: 铵态氮 Soil ammonium nitrogen; 硝态氮 Soil nitrate nitrogen; MBC: 土壤微生物量碳 Soil microbial biomass carbon; MBN: 土壤微生物量氮 Soil microbial biomass nitrogen

3 讨论

3.1 火烧黑炭对土壤可溶性碳氮含量的影响

土壤活性有机质是林地物质循环的核心^[18]。其中,土壤 DOC 含量虽然只占土壤全碳的极小部分,但它可以直接参与土壤生物化学转化过程,还是土壤微生物活动的能量和养分来源^[19]。森林管理措施如森林采伐、施肥和炼山等能通过改变输入有机物质的数量和质量,以及土壤微生物的活性来影响土壤 DOC 含量^[20]。本研究中,火烧土壤 DOC 含量要低于对照土壤(图 2),但在 0—10 cm 土层差异不显著,这与孔健健和杨健^[17]在大兴安岭落叶林的研究结果不同,这可能是由于对照处理的选择不同,本研究中对照区为采伐迹地未火烧区域,来自地上部分的有机物输入也减少,而在孔健健和杨健^[21]的研究中对照区凋落物输入并没有受到显著影响。然而,10—20 cm 土层的火烧土壤 DOC 含量要显著低于对照土壤(图 2),从而说明火烧对土壤 DOC 的影响因土层而异,火烧不仅仅影响表层土壤的 DOC 含量,也会影响土壤 DOC 含量的空间分布^[22]。火烧对土壤 DON 的影响也因土层而异,0—10 cm 土层火烧和对照土壤 DON 含量没有显著差异,但在 10—20 cm 土层火烧土壤的 DON 含量显著低于对照土壤,特别是在黑炭输入量较少的处理(B0 和 B1),说明黑炭的输入有助于增加土壤 DON 的含量,这可能与黑炭的高比表面积和强吸附性能有关^[9,23]。

土壤 DOC 含量与土壤含水率呈显著正相关(表 2),与周文君等^[22]在热带季节雨林的研究结果一致,这是由于土壤较高的水分含量提高了微生物活性,从而促进了水溶性有机化合物的形成^[24]。本研究土壤 DOC 含量与土壤 pH 不存显著相关性,一般认为土壤 pH 能通过物理-化学和生物学过程来影响土壤 DOC 的移动性,然而室内和野外试验结果由于时空尺度不同而存在差异^[25],野外条件下土壤溶液与原状土壤达到平衡状态可能是土壤 DOC 含量与土壤 pH 缺乏相关性的原因之一^[18]。火烧土壤的 pH 高于对照土壤,特别是在双倍黑炭输入量处理具有较高的土壤 DON 含量,然而,土壤 DON 含量与土壤 pH 也不存在显著相关性,这与林宝平等^[26]对滨海沙地人工林火烧土壤的研究结果相反,该研究发现土壤 DON 含量与土壤 pH 存在极显著负相关关系。

3.2 火烧黑炭对土壤矿质氮含量的影响

很多研究表明,火烧后短期内土壤矿质氮含量会增加^[6,27],这是由于一方面燃烧过程可以将土壤有机氮转化为矿质氮,另一方面土壤环境的改变能增加土壤矿化和硝化作用,而且火后植物和微生物对矿质氮的吸收作用也减弱。随着火后植物和土壤微生物的吸收利用,土壤矿质氮会恢复到火烧前的水平,恢复时间与火烧类型、土壤深度和气候条件有关^[27]。Meta-analysis 分析结果发现,火后土壤硝态氮的恢复一般比铵态氮需要更长的时间^[27],本研究中,炼山 1 年后火烧和对照土壤的矿质氮含量没有显著差异,在炼山 1 个月月在火烧样地和未火烧样地均种植了 1 年生闽楠幼苗,且对不同处理样地的抚育等森林管理措施一致,可以认为闽楠幼苗的生长和吸收不会显著影响不同处理土壤矿质氮含量的差异,未来应对火烧和对照土壤闽楠幼苗氮吸收特征开展进一步研究。火后土壤矿质氮的恢复可能与研究样地的气候和地形条件有关,南方雨热同季,土壤淋溶现象严重,因而火烧所引起的硝态氮增加效应会在更短的时间内消失,甚至出现火烧土壤矿质氮含量降低的现象,这与林宝平等在滨海沙地人工林的研究结果一致^[26],而在大兴安岭落叶林中,火烧 1 年后土壤矿质氮含量仍极显著高于对照土壤^[28],可能是因为大兴安岭落叶林中降雨较少,土壤对养分的固持能力强,因而矿质氮淋失较慢。

黑炭是森林火烧过程中不完全燃烧的产物,与燃烧产生的灰分不同,黑炭可以在土壤中存留上百年甚至上千年的时间^[1]。黑炭不仅可以改变土壤的物理、化学和生物学性质,还能影响土壤养分特别是氮循环过程^[9-10]。一般认为,火烧可以增加土壤中的净硝化作用,这是由于:(1)黑炭具有较强的吸附性能,可以吸附对硝化作用有抑制作用的有机化合物如单萜等^[29],还能吸附增强氮固定作用的含碳化合物如多酚^[9];(2)黑炭能增强氮转化微生物的活性,因为黑炭本身能为土壤微生物提供碳源^[30],其多孔性还能为微生物生长提供适宜的栖息环境^[31],如在干燥山地森林的研究发现^[10],火烧产生的黑炭能影响硝化微生物群落的组成和功

能,从而增强土壤硝化作用。本研究中,为保证不同黑炭输入量有足够时间改善土壤环境进而影响微生物对土壤氮转化的调控过程,选择在黑炭布置 1 年后进行土壤采集和分析,结果发现不同黑炭输入量处理之间土壤硝态氮含量并没有显著差异(图 3),这可能由于本研究样地属于湿润的亚热带,相比之前研究的北方森林和温带高山森林,湿润多雨,土壤本身具有较高的硝化活性,之前的研究也发现,添加黑炭对硝化微生物活性较高的草地土壤硝化潜势并没有显著影响^[9]。此外,黑炭输入还可以增加土壤的养分保持能力^[8,32],本研究也发现下层土壤铵态氮含量随着黑炭输入量的增加而增加(图 3),说明黑炭输入增加了土壤对铵态氮的固持能力,这是由于黑炭输入增加了土壤中可以进行静电吸附(Electrostatic adsorption)的位点,从而增加了对铵态氮的吸附^[8]。本研究中,黑炭输入一方面增加了土壤对铵态氮的保持能力,另一方面并没有增强土壤的净硝化作用,因而减小了火烧后硝态氮含量增加所导致的淋失风险,这对于新造林地的养分特别是氮素保持具有重要意义。

3.3 火烧黑炭对土壤微生物量碳氮含量的影响

土壤微生物生物量能反映土壤微生物活性特征,可以作为土壤质量应对环境干扰(如火烧)的敏感评价指标^[33]。火烧后短期内土壤微生物量急剧下降^[34-35],这是由于燃烧过程中的高温可以直接杀死微生物,而且火烧后来自地上部分凋落物的活性有机物质输入减少^[36]。随着火后植被的恢复和土壤环境的改变土壤微生物量会逐渐恢复到火烧前的水平,这与火后恢复时间、土壤和植被类型、火烧强度和频率有关^[37]。本研究中,火烧 1 年后土壤 MBC 和 MBN 含量仍低于对照土壤,特别是受火烧直接干扰的表层土壤(图 4),这是由于本研究样地为马尾松人工林的采伐迹地,一方面炼山消耗了大部分的采伐剩余物,另一方面来自新造树木的凋落物输入较少。此外,本研究中对照区域地上部分有机物质输入量也减少,但土壤并未受到火烧直接干扰,因而火烧与对照土壤微生物量的差异可能是火烧样地速效养分的淋溶损失导致土壤可利用养分下降引起的^[38]。

受气候和林地条件的影响,火烧时不充分燃烧会形成黑炭等固体产物存留在林地中,而且黑炭在林地的分布有很高的异质性^[39-41],从而影响土壤理化性质如含水率和 pH 等(表 1)。本研究结果表明,火烧后土壤黑炭输入量的差异能影响土壤微生物生物量的恢复,特别是土壤 MBN 含量(图 4)。土壤 MBN 含量随着火后黑炭输入量的增加而增加,移除黑炭后土壤 MBN 含量显著低于对照土壤,而有黑炭输入处理中火烧土壤 MBN 含量与对照土壤没有显著性差异,从而说明黑炭有助于土壤微生物生物量的恢复。可能的原因有:1)改善土壤理化性质,本研究中土壤含水率和 pH 均随着黑炭输入量的增加而增加(表 1),而土壤微生物量碳氮含量与土壤含水率呈极显著正相关(表 2);2)黑炭具有较高的比表面积和很强的吸附性能,能吸附水分和铵态氮等养分,从而为微生物生长提供有利的微环境条件^[9,23]。另外,本研究中,火烧土壤 MBC/MBN 随着黑炭输入量的增加而减少(图 4),说明黑炭输入提高了土壤氮素的有效性。火烧与对照土壤 MBC/MBN 的差异与黑炭输入量有关,去除黑炭处理(B0)土壤 MBC/MBN 要高于对照土壤,说明火后移除黑炭减少了土壤的氮素供应能力,可能是移除黑炭减少了对土壤养分的吸附作用,从而增加了土壤中氮素等养分的损失。未来研究应该通过高通量测序等分子生物学手段来研究火烧土壤中的微生物群落(特别是氮转化功能微生物)结构及其丰度变化特征。

4 结论

(1)炼山对土壤 DOC 和 DON 含量的影响因土层而异,炼山 1 年后,10—20 cm 火烧土壤 DOC 和 DON 含量显著低于对照土壤,而在 0—10 cm 表层土壤没有显著差异。火烧土壤 MBC 和 MBN 含量均低于对照土壤,说明土壤微生物群落还未恢复。

(2)土壤 C 库、铵态氮含量和 MBN 含量与炼山黑炭输入量成正比,黑炭输入对火烧土壤的微生物群落恢复和 N 素保持具有积极意义,因此亚热带人工林管理过程中应重视黑炭的利用,建议将一些堆烧后生成的黑炭均匀铺设在林地,从而有益于改善土壤环境和养分固持。

(3) 考虑到火烧影响的长效性,未来应继续关注土壤碳氮库和微生物群落特征的时空变化特征。此外,鉴于黑炭对采伐迹地火烧土壤 N 素保持的重要性,今后应从 N 转化功能微生物角度深入研究黑炭对火烧土壤 N 素循环的影响机理。

参考文献 (References):

- [1] Santín C, Doerr S H, Kane E S, Masiello C A, Ohlson M, de la Rosa J M, Preston C M, Dittmar T. Towards a global assessment of pyrogenic carbon from vegetation fires. *Global Change Biology*, 2016, 22(1): 76-91.
- [2] Pellegrini A F A, Ahlström A, Hobbie S E, Reich P B, Nieradzik L P, Staver A C, Scharenbroch B C, Jumpponen A, Anderegg W R L, Randerson J T, Jackson R B. Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. *Nature*, 2018, 553(7687): 194-198.
- [3] Bonanomi G, Antignani V, Pane C, Scala E. Suppression of soilborne fungal diseases with organic amendments. *Journal of Plant Pathology*, 2007, 89(3): 311-324.
- [4] 杨玉盛, 何宗明, 马祥庆, 林开敏, 俞新妥. 论炼山对杉木人工林生态系统影响的利弊及对策. *自然资源学报*, 1997, 12(2): 153-159.
- [5] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 刘乐中. 采伐和火烧对森林氮动态的影响. *生态学报*, 2008, 28(9): 4460-4468.
- [6] Wang Y Z, Xu Z H, Zhou Q X. Impact of fire on soil gross nitrogen transformations in forest ecosystems. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(6): 1030-1040.
- [7] Lehmann J. A handful of carbon. *Nature*, 2007, 447(7141): 143-144.
- [8] Steiner C, Glaser B, Gerales Teixeira W, Lehmann J, Blum W E H, Zech W. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(6): 893-899.
- [9] DeLuca T H, MacKenzie M D, Gundale M J, Holben W E. Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2): 448-453.
- [10] Ball P N, MacKenzie M D, DeLuca T H, Montana W E H. Wildfire and charcoal enhance nitrification and ammonium-oxidizing bacterial abundance in dry montane forest soils. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39(4): 1243-1253.
- [11] Kalbitz K, Schmerwitz J, Schwesig D, Matzner E. Biodegradation of soil-derived dissolved organic matter as related to its properties. *Geoderma*, 2003, 113(3/4): 273-291.
- [12] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisation, grazing and cultivation. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(9): 1231-1243.
- [13] Thomas B W, Whalen J K, Sharifi M, Chantigny M, Zebarth B J. Labile organic matter fractions as early-season nitrogen supply indicators in manure-amended soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016, 179(1): 94-103.
- [14] 林开敏, 章志琴, 曹光球, 何宗明, 马祥庆. 杉木与楠木凋落物混合分解及其养分动态. *生态学报*, 2006, 26(8): 2732-2738.
- [15] 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.
- [16] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [17] Jenkinson D S. Determination of microbial biomass carbon and nitrogen in soil//Wilson J R, ed. *Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Ecosystems*. Wallingford: CAB International, 1988: 368-385.
- [18] 庞学勇, 包维楷, 吴宁. 森林生态系统土壤可溶性有机质(碳)影响因素研究进展. *应用与环境生物学报*, 2009, 15(3): 390-398.
- [19] Montañó N M, García-Oliva F, Jaramillo V J. Dissolved organic carbon affects soil microbial activity and nitrogen dynamics in a Mexican tropical deciduous forest. *Plant and Soil*, 2007, 295(1/2): 265-277.
- [20] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304.
- [21] 孔健健, 杨健. 火烧对中国东北部兴安落叶松林土壤性质和营养元素有效性的影响. *生态学杂志*, 2013, 32(11): 2837-2843.
- [22] 周文君, 沙丽清, 张一平, 宋清海, 刘运通, 邓云, 邓晓保. 热带季节雨林土壤 DOC 与 DN 特征及其影响因子. *北京林业大学学报*, 2016, 38(9): 34-41.
- [23] Liang B, Lehmann J, Solomon D, Kinyangi J, Grossman J, O'Neill B, Skjemstad J O, Thies J, Luizão F J, Petersen J, Neves E G. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(5): 1719-1730.
- [24] Falkengren-Grerup U, Tyler G. The importance of soil acidity, moisture, exchangeable cation pools and organic matter solubility to the cationic composition of beech forest (*Fagus sylvatica* L.) soil solution. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 1993, 156(4): 365-370.

- [25] You S J, Yin Y J, Allen H E. Partitioning of organic matter in soils; effects of pH and water/soil ratio. *Science of the Total Environment*, 1999, 227(2/3): 155-160.
- [26] 林宝平, 何宗明, 郜士垒, 林宇, 黄志群, 林思祖. 林火干扰对滨海沙地人工林土壤碳氮库的影响. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(5): 780-786.
- [27] Wan S Q, Hui D F, Luo Y Q. Fire effects on nitrogen pools and dynamics in terrestrial ecosystems: a meta-analysis. *Ecological Applications*, 2001, 11(5): 1349-1365.
- [28] 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.
- [29] White C S. Monoterpenes: their effects on ecosystem nutrient cycling. *Journal of Chemical Ecology*, 1994, 20(6): 1381-1406.
- [30] Pietikäinen J, Kiikkilä O, Fritze H. Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. *Oikos*, 2000, 89(2): 231-242.
- [31] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, Rillig M C. Mycorrhizal responses to biochar in soil - concepts and mechanisms. *Plant and Soil*, 2007, 300(1/2): 9-20.
- [32] Lehmann J, Pereira da Silva J Jr, Steiner C, Nehls T, Zech W, Glaser B. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 343-357.
- [33] Holden S R, Treseder K K. A meta-analysis of soil microbial biomass responses to forest disturbances. *Frontiers in Microbiology*, 2013, 4: 163.
- [34] Dooley S R, Treseder K K. The effect of fire on microbial biomass: a meta-analysis of field studies. *Biogeochemistry*, 2012, 109(1/3): 49-61.
- [35] 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.
- [36] Grady K C, Hart S C. Influences of thinning, prescribed burning, and wildfire on soil processes and properties in southwestern ponderosa pine forests: a retrospective study. *Forest Ecology and Management*, 2006, 234(1/3): 123-135.
- [37] 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.
- [38] Stephan K, Kavanagh K L, Koyama A. Effects of spring prescribed burning and wildfires on watershed nitrogen dynamics of central Idaho headwater areas. *Forest Ecology and Management*, 2012, 263: 240-252.
- [39] 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.
- [40] 任清胜, 辛颖, 赵雨森. 重度火烧对大兴安岭落叶松天然林土壤团聚体有机碳和黑碳的影响. *北京林业大学学报*, 2016, 38(2): 29-36.
- [41] 王曦, 杨靖宇, 俞元春, 侯文军, 侯也, 余健, 王如海. 不同功能区城市林业土壤黑碳含量及来源——以南京市为例. *生态学报*, 2016, 36(3): 837-843.