

马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤营养元素含量的短期影响

杜大俊¹, 张秋霞¹, 任丽红¹, 严强², 刘先¹, 胡亚林¹, 王玉哲¹

(1.福建农林大学林学院,福州 350002; 2.福建农林大学西芹教学林场,福建 南平 353000)

摘要:以中亚热带33年生马尾松人工林采伐迹地为研究对象,分析了炼山1年后移除黑炭(B0)、单倍黑炭(B1)、双倍黑炭(B2)处理和未炼山对照(UB)土壤可提取态常量(P、K、Ca、Na、Mg)和微量(Al、Fe、Mn、Cu、Zn)元素含量及其比值的变化特征。结果表明:(1)黑炭输入量对土壤常量元素的影响因土层而异,在0—10 cm土层,B2土壤K、Ca和Mg含量显著高于B0土壤($P < 0.05$),黑炭输入量对10—20 cm土壤常量元素含量没有影响($P > 0.05$)。在0—10、10—20 cm土层,B2土壤速效P含量均显著高于UB土壤($P < 0.05$)。不同黑炭输入量处理土壤速效P含量无显著差异($P > 0.05$);(2)不同黑炭输入量处理土壤微量元素含量无显著差异($P > 0.05$),但在10—20 cm土层,B2土壤Mn含量显著高于UB土壤($P < 0.05$);(3)炼山没有显著影响土壤钠钾吸附比(SPAR)、Ca/Mg和Ca/Al。黑炭输入量对土壤Ca/Mg的影响因土层而异,在10—20 cm土层,B2处理土壤Ca/Mg显著高于B0和B1处理土壤Ca/Mg($P > 0.05$),而在0—10 cm土层不同黑炭处理土壤Ca/Mg没有显著差异($P < 0.05$)。因此,炼山产生的黑炭在短期内有助于提高土壤常量养分元素含量,并对于维持土壤结构稳定性具有积极意义,今后应持续监测黑炭对土壤养分的长期影响,从而完善炼山黑炭在人工林经营管理中的应用。

关键词: 炼山; 黑炭; 常量元素; 微量元素; 土壤元素含量比值

中图分类号: S750

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0157-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.05.023

Short-term Effects of Black Carbon on Soil Extractable Nutrient Elements in a *Pinus massoniana* Plantation Subjected to Slash Burning

DU Dajun¹, ZHANG Qiuxia¹, REN Lihong¹, YAN Qiang², LIU Xian¹, HU Yalin¹, WANG Yuzhe¹

(1.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002;

2.Xiqin Forestry Station of Fujian Agriculture and Forestry University, Nanping, Fujian 353000)

Abstract: The objective of this study was to investigate the effects of fire-derived black carbon on soil extractable nutrient elements in subtropical plantations. Three levels of black carbon input were applied to the experimental plots (10 m × 10 m) by removing charred materials across the plots two weeks after slash burning in a *Pinus massoniana* Lamb. plantation. The three levels of black carbon were: B0, in which all visible charred materials were carefully removed from the plot; B1, in which all charred materials were left in place on the forest floor; and B2, in which all charred materials removed from the B0 plots and the double quantities of charcoal inputs were added. Soil samples were collected from 0—10 and 10—20 cm depth 1 year after charcoal application or removal. The results showed that: (1) The impact of black carbon input on soil major nutrients varied with sampling depth. At 0—10 cm depth, the contents of potassium(K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) in B2 soils were significantly higher than those in B0 soils ($P < 0.05$), which differences were not observed at the 10—20 cm depth. Available phosphorus (P) contents in B2 soils were significantly higher than those in UB soils at both 0—10 cm and 10—20 cm depth ($P < 0.05$). (2) The amount of black carbon input had no effect on soil minor nutrients ($P > 0.05$). Double the quantities of black carbon input significantly increased manganese (Mn) content compared with the UB soils ($P < 0.05$). (3) There was no significant differences of soil SPAR, Ca/Al, and Ca/Mg except for Ca/Mg at the 10—20 cm depth, where Ca/Mg in B2 soil was significantly higher than those in B0 and B1 soil ($P < 0.05$). In summary, our findings highlighted the importance of black carbon to improve soil fertility and structural stability in subtropical plantations subjected to slash burning in the short term. Future research should focus on the long-term impacts of black carbon on soil

收稿日期:2019-04-01

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

第一作者:杜大俊(1993—),男,硕士研究生,主要从事人工林水土保持生态修复研究。E-mail:1045694151@qq.com

通信作者:王玉哲(1986—),男,讲师,硕士生导师,主要从事森林火灾生态研究。E-mail:wangyuzhe@fafu.edu.cn

nutrient availability in subtropical plantations subjected to slash burning.

Keywords: slash burning; black carbon; major elements; minor elements; soil nutrient ratios

火是森林生态系统中普遍存在的干扰因子,不仅有利于生态系统群落的分配,还有利于维持生态系统的结构和功能^[1]。随着全球变暖和人类活动影响的增加,林火发生的频率呈上升趋势。炼山是我国南方一项传统的森林管理措施,是一种人为控制的林火。由于炼山后会导致土壤速效养分的流失,一般认为炼山对于土壤肥力有负面效应^[2],会导致土壤地力衰退,但对于受松材线虫病感染的马尾松人工林采伐迹地来说,炼山仍然是控制病虫害向新造林地蔓延的有效管理措施。

火烧可以影响土壤的理化性质^[3]。一方面,燃烧过程产生的热会对土壤产生直接影响;另一方面,燃烧产物如黑炭能改变森林地表微环境条件(如土壤温度和水分含量),进而影响土壤微生物的数量和活性,对土壤产生间接影响。火烧对土壤性质的影响与火烧强度、土壤类型、环境条件等因素有关。火烧不仅会影响土壤的理化性质,还会影响土壤中关键养分的有效性^[4]。目前国内外研究火烧对土壤养分的影响多集中在火烧对土壤碳氮库的影响^[2,5],而对于火烧对土壤中营养元素含量及其比值的研究相对较少。

火烧过程中植被残枝和凋落物不完全燃烧产生的黑炭,具有稳定性高、孔隙多、含碳量高等特点^[6]。有研究^[7]表明,施加黑炭不仅能减少土壤中温室气体的排放,还能提高土壤持水能力和养分含量。Laird 等^[8]在对美国中西部农业土壤的研究中发现,向土壤中施加黑炭可以提高土壤的养分保持能力,从而减少土壤养分淋失;王玉哲等^[2]对中亚热带马尾松人工林采伐迹地的研究也发现,火烧黑炭输入有利于土壤氮素的保持,但对于其他营养元素含量的影响还有待研究。

本研究以中亚热带 33 年生马尾松人工林采伐迹地为研究对象,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常量元素(P、K、Ca、Na、Mg)和微量元素(Al、Fe、Mn、Cu、Zn)含量、酸性磷酸酶活性、土壤钠钾吸附比(SPAR 值)、Ca/Mg 和 Ca/Al 的差异及其影响机理,旨在为今后完善炼山管理措施提供理论数据,从而为马尾松人工林的可持续性发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于福建农林大学西芹教学林场,地处福建省南平市延平区西芹镇,地理坐标为 26°33′00″ N, 118°06′00″ E。气候类型为中亚热带季风气候,海拔 200~500 m,年平均气温 19.4℃,最低温度-5.8℃,极端最高温 41℃,年平均降水量 1 817 mm,年平均日照时间 1 807.8 h,无霜期 302 d。林下土壤类型主要为黄红

壤,坡度为 25°左右。林下植被主要有冬青(*Ilex chinensis* Sims)、黑莎草(*Gahnia tristis*)、狗脊(*Woodwardia japonica*)、鱼腥草(*Houttuynia cordata*)、构棘(*Cudrania cochinchinensis*)、草珊瑚(*Sarcandra glabra*)等。

1.2 试验设计

试验样地为西芹教学林场院口工区 33 年生马尾松人工林,面积为 2.8 hm²,2015 年底对林地内马尾松进行皆伐,由于该林地马尾松感染松材线虫病,为避免病害向新造林地蔓延,林场工作人员于 2016 年 3 月 21 日对采伐迹地进行炼山。为了研究炼山和炼山产生的黑炭对土壤养分有效性的影响,笔者于 2016 年 3 月 27 日(炼山 1 周后)在火烧样地中随机选取 4 个区域,在每个区域分别设置 3 个面积为 100 m²(10 m×10 m)的小区布置黑炭输入量试验处理。3 个黑炭输入量处理分别为:将炼山后的黑炭移出该小区(移除黑炭 B0)、对黑炭不作处理(单倍黑炭 B1)和将 B0 处理中移除的黑炭均匀铺设到该小区(双倍黑炭 B2)。在 B2 处理中,黑炭均匀铺设在地表,并未进行任何与土壤混合的操作。同时,选取每个区域附近的未火烧的区域作为对照处理(UB)。更多试验样地信息见王玉哲等^[2]研究结果。

1.3 样品采集与分析

于 2017 年 3 月 21 日(炼山 1 年后)进行土壤样品采集,在每个样方内按“S”形取样法随机选 8 个点,采集 0—10、10—20 cm 的土壤,按土层混合均匀后冷藏运回实验室。挑出混合土样中的根、石块等杂物,然后过 2 mm 筛,将过完筛的土分成 2 份,一份自然风干,用于测定土壤 pH、速效 P、土壤有效态元素含量;另一份在 4℃冰箱冷藏保存,用于测定土壤酸性磷酸酶活性。

土壤 pH 按水土比 2.5:1 混合均匀后用 pH 计测定;土壤速效 P 用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提,钼锑抗比色法^[9]测定;土壤酸性磷酸酶活性采用对硝基苯酚法^[10]测定;土壤有效态元素含量用 ICP-OES(PE Optima 8000,美国)测定^[11]。

土壤钠吸附比(SAR 值)表示土壤中 Na 含量与 Ca、Mg 含量的关系,是反映土壤质量的重要指标,SAR 值越大,土壤越容易盐碱化^[12]。但是,土壤溶液中通常还富含其他离子,如 K⁺,高浓度的 K⁺可以引起黏土分散和降低团聚体稳定性^[13]。有研究^[4]表明,火烧后土壤中 K 含量会明显升高,K 的影响是不可忽视的,因此可以用土壤钠钾吸附比(SPAR 值),即 $SPAR = (Na + K) / (Ca + Mg)^{1/2}$,来代替 SAR 值作为检测土地退化过程的指标。

1.4 数据处理

用 Excel 软件对试验数据进行计算和整理。用

SPSS 22.0 软件进行统计分析,用单因素方差(One-way ANOVA)分析火烧黑炭对土壤营养元素含量和相关比值的影响,采用 LSD 检验比较各处理之间的差异性($\alpha=0.05$)。用 Origin 8.5 软件进行作图。

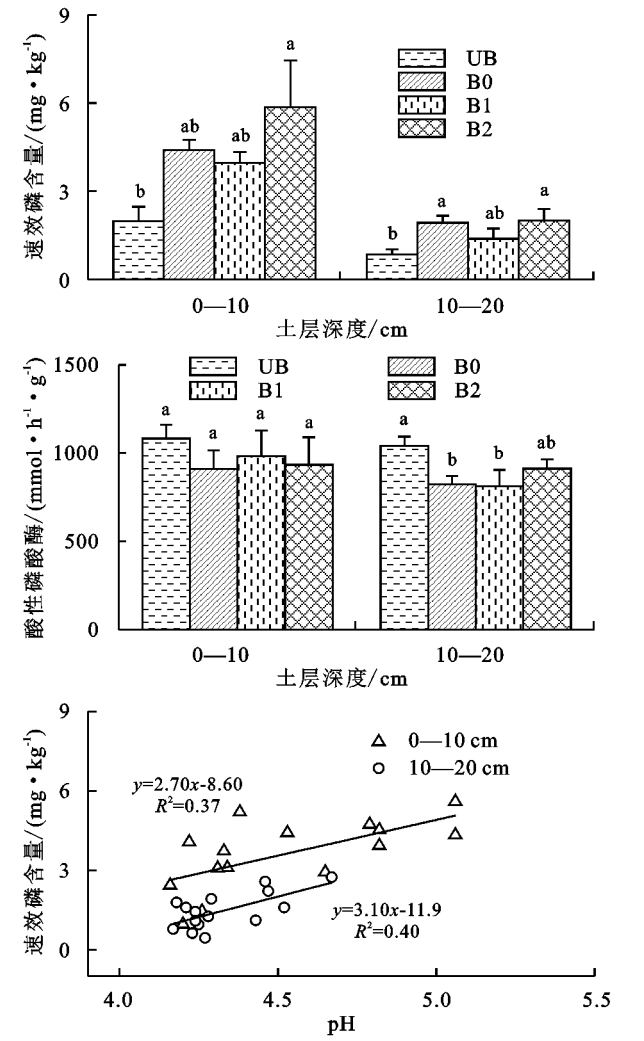
2 结果与分析

2.1 土壤速效磷含量和酸性磷酸酶活性

由图 1 可知,炼山 1 年后,火烧土壤速效 P 含量均高于对照土壤。在 0—10,10—20 cm 土层,B2 处理火烧土壤速效 P 含量均显著高于对照土壤($P<0.05$)。不同黑炭输入量处理的火烧土壤之间速效 P 含量无显著差异($P>0.05$)。在 0—10,10—20 cm 土层,土壤速效 P 含量都与土壤 pH 呈正相关。炼山对土壤酸性磷酸酶活性的影响因土层而异。在 0—10 cm 土层,火烧土壤和对照土壤酸性磷酸酶活性没有显著差异($P>0.05$);在 10—20 cm 土层,B0 处理和 B1 处理火烧土壤酸性磷酸酶活性都显著低于对照土壤($P<0.05$),而 B2 处理火烧土壤与对照土壤酸性磷酸酶活性没有显著差异($P>0.05$)。黑炭输入量对土壤酸性磷酸酶活性没有显著影响($P>0.05$)。

2.2 土壤常量元素含量特征

由图 2 可知,B1 处理火烧土壤与对照土壤的 K、Ca、Na 和 Mg 含量均没有显著差异($P>0.05$)。黑炭输入量对土壤常量元素的影响因土层而异,在 0—10 cm 土层,B2 处理火烧土壤 K、Ca、Mg 含量显著高于 B0 处理火烧土壤($P<0.05$);黑炭输入量对 10—20 cm 土壤常量元素含量没有影响($P>0.05$)。



注:图中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 土壤速效磷含量和酸性磷酸酶活性

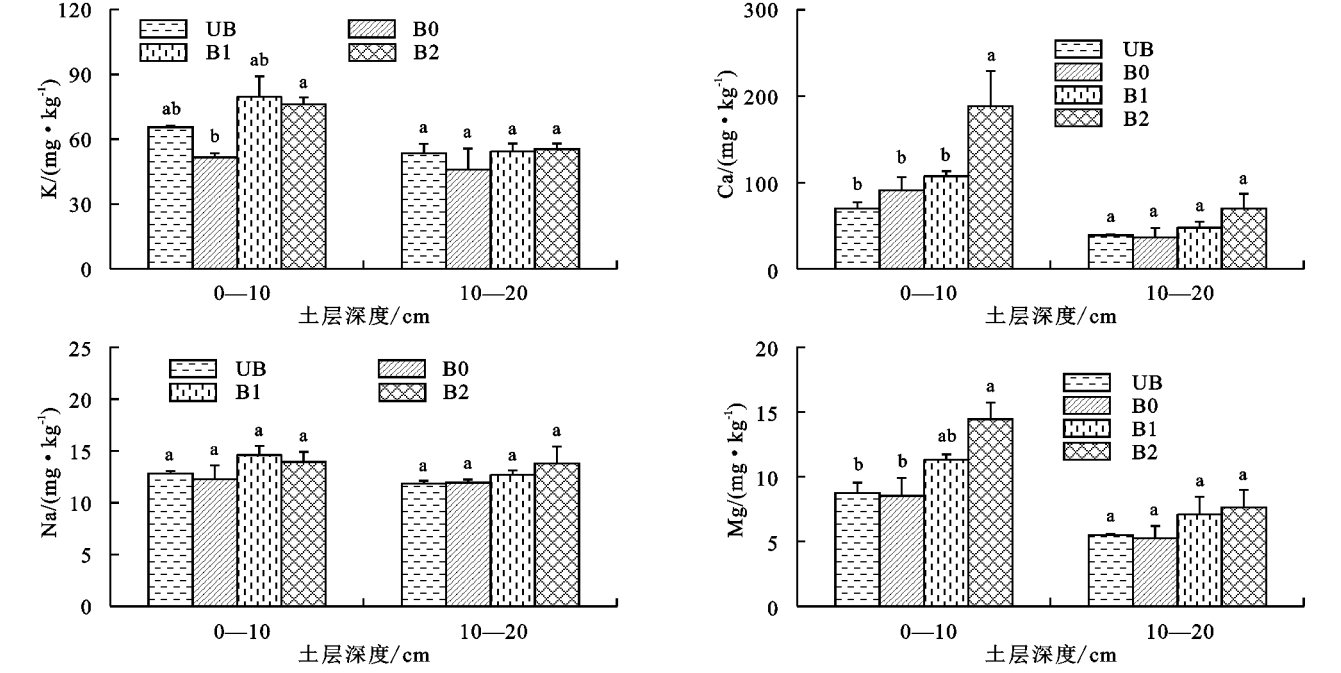


图 2 土壤常量元素含量特征

2.3 土壤微量元素含量特征

从表 1 可以看出,B1 处理火烧土壤与对照土壤

Al、Mn、Zn 含量均没有显著差异($P>0.05$)。在 10—20 cm 土层,B1 处理火烧土壤 Fe 含量显著高于

对照土壤 ($P < 0.05$); 在 0—10, 10—20 cm 土层, B1 处理火烧土壤 Cu 含量均显著低于对照土壤 ($P < 0.05$)。不同黑炭输入量处理的火烧土壤之间微量元素

素含量无显著差异 ($P > 0.05$), 但在 10—20 cm 土层, B2 处理火烧土壤 Mn 含量显著高于对照土壤 ($P < 0.05$)。

表 1 土壤微量元素含量 单位: mg/kg

元素	土层深度/cm	对照(UB)	移除黑炭(B0)	单倍黑炭(B1)	双倍黑炭(B2)
Al	0—10	180.20±21.25a	113.22±6.73b	132.48±10.20ab	134.71±20.35ab
	10—20	154.89±26.42a	132.99±13.68a	151.09±17.32a	165.05±2.04a
Fe	0—10	87.86±4.35a	94.39±9.81a	100.37±10.32a	93.88±6.23a
	10—20	46.65±3.11b	63.10±6.46a	70.62±4.65a	64.65±5.26a
Mn	0—10	33.06±5.57a	31.54±9.25a	44.56±4.65a	56.30±13.38a
	10—20	11.21±1.82b	15.23±7.32ab	25.18±3.34ab	31.30±7.77a
Cu	0—10	1.82±0.22a	0.93±0.05b	1.27±0.11b	1.15±0.13b
	10—20	2.14±0.40a	0.98±0.21b	1.34±0.16b	1.03±0.12b
Zn	0—10	2.28±0.19a	1.87±0.17a	2.27±0.23a	2.63±0.29a
	10—20	1.68±0.20a	1.57±0.19a	1.76±0.16a	1.61±0.01a

注: 表中数据为平均值±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 ($P < 0.05$)。

2.4 土壤元素比值特征

从图 3 可以看出, 火烧对土壤 SPAR 值、Ca/Mg 值和 Ca/Al 值均无显著影响 ($P > 0.05$)。黑炭输入量对土壤 Ca/Mg 值的影响因土层而异, 在 10—20 cm 土层, B2 处理火烧土壤 Ca/Mg 值显著高于 B0 处理和 B1 处理火烧土壤 ($P < 0.05$); 黑炭输入量对 0—10 cm 土层土壤 Ca/Mg 值无显著影响 ($P > 0.05$)。在 0—10, 10—20 cm 土层, 黑炭输入量对土壤 SPAR 值和 Ca/Al 值均无显著影响 ($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 炼山黑炭对土壤常量元素含量的影响

P 是植物生长发育必需的营养元素之一, 速效 P 是植物吸收利用的主要形态^[14]。土壤酸性磷酸酶主要来源于微生物和植物根系的分泌, 可以影响土壤中 P 的有效性。土壤酸性磷酸酶活性与土壤速效 P 的供给速率密切相关, 因为土壤中的速效 P 主要来自有机 P 的矿化, 而酸性磷酸酶在其中起到了重要作用^[15]。本研究发现, 火烧虽然降低了 10—20 cm 土层酸性磷酸酶活性, 但火烧后的黑炭输入能显著提高土壤速效 P 含量(图 1)。这是因为添加黑炭提高了土壤 pH^[6], 而土壤速效 P 含量与土壤 pH 呈正相关(图 1), 因此添加黑炭可以提高土壤速效 P 含量。

本研究中, 炼山 1 年后土壤常量元素 K、Ca、Na、Mg 含量高于对照土壤(图 2), 说明炼山在短期内提高了土壤常量元素的含量。因为植被残枝和凋落物在燃烧过程中, 会将自身含有的营养元素释放出来, 并且由于这些元素较难挥发, 通常不会因挥发而损失, 因此会伴随灰分落到地面, 从而使土壤常量元素含量增加。黑炭是有机物质不完全燃烧的产物, 黑炭的产生量与火烧强度有关^[16]。由于黑炭本身多孔的结构特点, 所以土壤中的黑炭能够吸附和保持水分, 从而改善土壤条件。冯爱青等^[6]研究发现, 添加玉米

秸秆黑炭显著提高了土壤 K 含量。同样, 本研究也发现, 双倍黑炭处理火烧土壤有效态 K、Ca 和 Mg 含量显著高于移除黑炭处理火烧土壤, 而且双倍黑炭处理火烧土壤有效态 Ca 和 Mg 含量显著高于未火烧对照土壤, 说明炼山产生的黑炭有利于提高土壤 K、Ca 和 Mg 元素的有效性, 对于保持火后林地的土壤肥力具有积极意义。

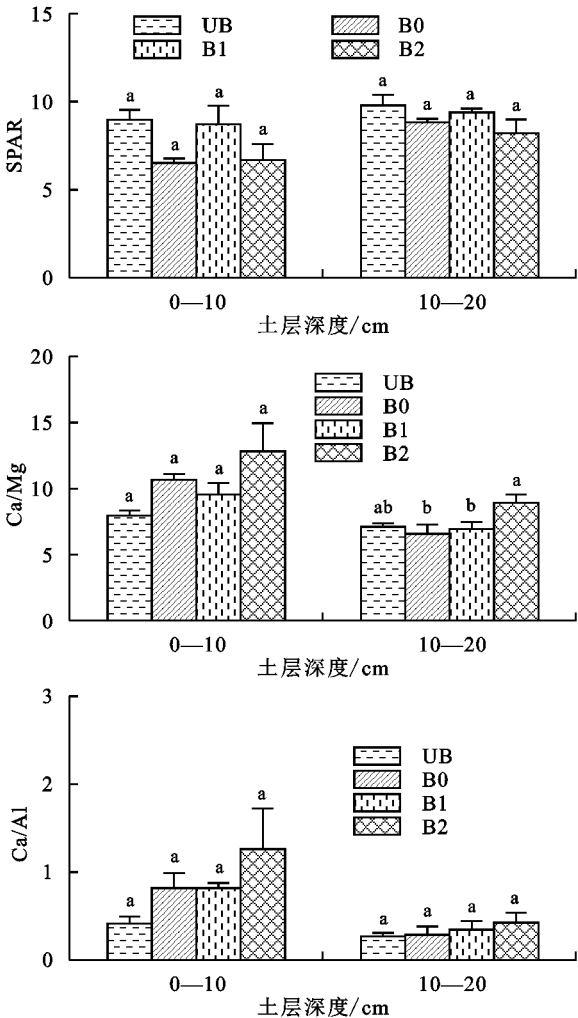


图 3 火烧对土壤 SPAR、Ca/Mg 和 Ca/Al 的影响

3.2 炼山黑炭对土壤微量元素含量的影响

土壤中的微量元素主要来自于岩石矿物的风化作用,其中 Fe、Mn、Cu、Zn 是植物生长所必需的微量元素。有研究^[3]表明,火烧后土壤可溶性微量元素如 Fe、Mn、Al、Zn 的含量可能会降低^[4],因为火烧使土壤 pH 升高,而土壤 pH 的升高会降低微量元素的溶解性^[17]。本研究发现,火烧后土壤 Cu 含量显著降低,因为火烧会使土壤有机质含量增加,而陈季等^[18]研究发现,土壤有机质含量与有效 Cu 含量呈负相关,因此火烧会使土壤 Cu 含量降低。火烧显著提高了 10—20 cm 土层土壤 Fe 含量,这与之前的研究^[13]结果并不一致,可能是生态系统的差异性导致的。添加黑炭显著提高了 10—20 cm 土层土壤 Mn 含量,而在 0—10 cm 土层差异不显著,可能是因为火烧土壤 Mn 含量的变异性较大,因此没有达到统计学上的显著性差异。火烧没有显著影响土壤中 Zn、Al 的含量。需要指出的是,本研究是黑炭布置 1 年后的试验结果,反映了黑炭对土壤养分的短期影响,黑炭对土壤微量元素的显著影响可能需要更长的时间来体现。因此,未来应持续监测黑炭对土壤元素的长期影响。

3.3 炼山黑炭对土壤营养元素比值的影响

有研究^[19]表明,土壤 SPAR 值较高时对土壤结构有负面影响。Pereira 等^[4]研究发现,低强度火烧对土壤性质不会产生负面影响,土壤 SPAR 值没有发生显著变化。本研究中,炼山 1 年后土壤 SPAR 值无显著变化,添加黑炭也没有显著影响土壤 SPAR 值,这可能是因为添加黑炭使 Ca、Mg 含量显著升高,而 K、Na 含量升高不明显,不足以影响比值的变化。本研究结果表明,炼山在短期内没有对土壤产生负面影响。Francos 等^[20]研究发现,火烧后的降雨会使土壤 SPAR 值升高,破坏土壤,这是因为火烧后,地表植被和凋落物对雨水的拦截作用大大减弱,裸露的土壤更容易被侵蚀,从而发生水土流失。因此,在今后的炼山管理中,应注意炼山后林地的护理,采取相应的措施,防止水土流失。

Ca 和 Mg 都是植物必需的常量元素,同时也是植物组织的重要组成成分。土壤 Ca/Mg 是反映土壤结构的指标,由于 Mg^{2+} 水合离子半径较大,对土壤的絮凝作用小于 Ca^{2+} ,所以土壤中较多的 Mg 不利于土壤结构的稳定。因此,土壤 Ca/Mg 大于 1 时,将更有利于土壤结构的稳定。本研究发现,在 10—20 cm 土层,添加黑炭能显著提高土壤 Ca/Mg,这说明添加黑炭有利于提高土壤稳定性。而叶丽丽等^[21]研究发现,向红壤中添加稻秸秆黑炭并不能提高土壤结

构稳定性,反而有可能加剧水土流失的风险,这可能是因为黑炭的产生和处理方式不同,从而产生了不同的环境效应。因此,火烧黑炭对土壤结构稳定性的影响还需进一步研究验证。

Al 是土壤含量最高的金属元素,土壤中溶解态的 Al 对植物具有毒性,浓度的升高会导致植物 Al 中毒,限制植物的生长,甚至导致森林退化。土壤 Ca/Al 是反映环境胁迫(如酸沉降和地力衰退)的指标,土壤中的 Ca 有利于植物抗 Al 毒,因此土壤中 Ca 含量较多时,即 Ca/Al 大于 1 时,将更有利于植物的生长。本研究发现,土壤 Ca/Al 随着黑炭输入量增加而增大,说明添加黑炭可以改善土壤,使土壤更有利于植物生长。此外,添加黑炭可以提高土壤 pH 值,土壤 pH 升高会降低 Al 的溶解性^[13],使土壤中溶解态的 Al 减少,同时还可以提高 Ca 的可利用性^[22]。添加黑炭减少了 Al 毒害的同时提高了营养元素的可利用性,因此可以促进植物生长。

4 结论

(1)炼山产生的黑炭在短期内有利于提高土壤常量元素(P、K、Ca 和 Mg)的有效性,对于保持火后林地的土壤肥力具有积极意义。

(2)炼山产生的黑炭在短期内对土壤有效态微量元素(Al、Fe、Mn、Cu、Zn)含量没有影响。

(3)炼山在短期内并没有减弱林地土壤结构的稳定性,火烧黑炭对土壤结构稳定性的正面效应还需在未来研究中进一步验证。

(4)由于火烧对土壤的影响是长期的,所以未来研究应关注不同时间序列土壤营养元素含量的变化特征。

参考文献:

- [1] Bond W J, Keeley J E. Fire as a global “herbivore”: The ecology and evolution of flammable ecosystems [J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2005, 20(7): 387-394.
- [2] 王玉哲,刘俊第,严强,等.马尾松林采伐迹地火烧黑炭对土壤活性碳氮的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(20): 7198-7207.
- [3] Certini G. Fire as a soil-forming factor [J]. *Ambio*, 2014, 43(2): 191-195.
- [4] Pereira P, Cerda A, Martin D, et al. Short-term low-severity spring grassland fire impacts on soil extractable elements and soil ratios in Lithuania [J]. *Science of The Total Environment*, 2017, 578: 469-475.
- [5] Nave L E, Vance E D, Swanston C W, et al. Fire effects on temperate forest soil C and N storage [J]. *Ecological Applications*, 2011, 21(4): 1189-1201.

- [6] 冯爱青,张民,李成亮,等.秸秆及秸秆黑炭对小麦养分吸收及棕壤酶活性的影响[J].生态学报,2015,35(15):5269-5277.
- [7] 高德才,张蕾,刘强,等.生物黑炭对旱地土壤 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放及其环境效益的影响[J].生态学报,2015,35(11):3615-3624.
- [8] Laird D, Fleming P, Wang B, et al. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil [J]. *Geoderma*, 2010, 158(3/4): 436-442.
- [9] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社, 2000:81-83.
- [10] Dick R P. Methods of soil enzymology [M]. Madison: Soil Science Society of America, 2011:163-168.
- [11] 孙媛媛,孙友宝,盖荣银,等.二乙烯三胺五乙酸(DT-PA)提取 ICP-AES 法测定土壤中有效态元素[J].环境化学,2015,34(8):1578-1579.
- [12] 王莉峰,熊黑钢,靳彦华,等.干旱区施不同浓度硝酸钾对后各耕地土壤水盐的影响[J].水土保持学报,2013, 27(4):191-195.
- [13] Pereira P, Übeda X, Martin D, et al. Wildfire effects on extractable elements in ash from a *Pinus pinaster* forest in Portugal [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(11):3681-3690.
- [14] 孔健健,张亨宇,荆爽.大兴安岭火后演替初期森林土壤磷的动态变化特征[J].生态学杂志,2017,36(6): 1515-1523.
- [15] 曾晓敏,高金涛,范跃新,等.中亚热带森林转换对土壤磷积累的影响[J].生态学报,2018,38(13):4879-4887.
- [16] 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[J].水土保持学报,2016,30 (5):322-326.
- [17] Inbar A, Lado M, Sternberg M, et al. Forest fire effects on soil chemical and physicochemical properties, infiltration, runoff, and erosion in a semiarid Mediterranean region [J]. *Geoderma*, 2014, 221/222: 131-138.
- [18] 陈季,乔沐.佳木斯市主要土壤微量元素含量评价及相关分析[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2004,22 (2):264-266.
- [19] Sara P. Soil aggregation response to a long- and short-term differences in the rainfall amount under arid and Mediterranean climate conditions [J]. *Geomorphology*, 2005,70:1-11.
- [20] Francos M, Pereira P, Alcañiz M, et al. Impact of an intense rainfall event on soil properties following a wildfire in a Mediterranean environment (North-East Spain) [J]. *Science of The Total Environment*, 2016, 572:1353-1362.
- [21] 叶丽丽,王翠红,周虎,等.添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J].土壤,2012,44(1):62-66.
- [22] 李力,刘娅,陆宇超,等.生物炭的环境效应及其应用的研究进展[J].环境化学,2011,30(8):1411-1421.
- (上接第 156 页)
- [13] 周祥,赵一鹤,张洪江,等.云南高原典型林分林下枯落物持水特征研究[J].生态环境学报,2011,20(2):248-252.
- [14] 吕刚,曹小平,卢慧,等.辽西海棠山森林枯落物持水与土壤贮水能力研究[J].水土保持学报,2010,24(3): 203-208.
- [15] Sato Y, Kumagai T O, Kume A, et al. Experimental analysis of moisture dynamics of litter layers-the effects of rainfall conditions and leaf shapes [J]. *Hydrological Processes*, 2010, 18(16):3007-3018.
- [16] 袁杰,曹广超,曹生奎,等.祁连山南坡不同植被类型枯落物及其土壤持水特性分析[J].生态科学,2018,37 (5):183-193.
- [17] 胡晓聪,金亮,黄乾亮.西双版纳热带山地雨林枯落物及其土壤水文功能[J].应用生态学报,2017,28(1):55-63.
- [18] 汪建芳,王兵,王忠禹,等.黄土高原典型植被枯落物坡面分布及持水特征[J].水土保持学报,2018,32(4): 139-144.
- [19] 王会京,王红霞,谢宇光.太行山不同林型枯落物持水性及生态水文效应研究[J].水土保持研究,2016,23 (6):135-139.
- [20] 吕刚,王磊,李叶鑫,等.辽西低山丘陵区针叶林与阔叶林枯落物持水性对比[J].中国水土保持科学,2017,15 (4):51-59.
- [21] 杨振奇,秦富仓,李晓琴,等.砭砂岩区主要造林树种枯落物及林下土壤持水特性[J].水土保持学报,2017,31 (3):118-122.
- [22] 喻阳华,李光容,严令斌,等.赤水河上游主要树种枯落物调蓄水分效应[J].中国水土保持科学,2015,13(3): 39-44.
- [23] 刘硕.青海省大通县主要造林树种枯落物水文效应研究[J].水土保持研究,2008,15(6):105-107.
- [25] 刘建立,王彦辉,管伟,等.宁南山区华北落叶松林枯落物水文特征研究[J].水土保持通报,2009,29(6):20-23.
- [24] 许文盛,王一峰,童晓霞,等.紫鹊界梯田区植被凋落物水资源调配特性[J].水土保持学报,2013,27(4):130-135.