

# 马尾松采伐剩余物堆烧对土壤养分元素含量的短期影响

王 款<sup>1</sup>, 梁诗强<sup>2</sup>, 程刘涛<sup>3</sup>, 姚 智<sup>3</sup>, 满家瑞<sup>3</sup>, 胡亚林<sup>1</sup>, 王玉哲<sup>1\*</sup>

(1. 福建农林大学菌草与生态学院, 福建 福州 350002; 2. 福建省罗源国有林场, 福建 罗源 350600;  
3. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002)

**摘要:** 【目的】研究堆烧马尾松疫木采伐剩余物对土壤养分的短期影响, 为制定科学的林地土壤肥力保持和植被恢复措施提供理论依据。【方法】以中亚热带马尾松采伐迹地为研究对象, 在堆烧 1 d 后采集未火烧对照和火堆不同位置(中心、边缘)的 0~5 cm 和 5~10 cm 土壤, 测定土壤 pH、含水量、有机质、全碳(C), 以及氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)、钠(Na)、铁(Fe)、锰(Mn)和铝(Al) 全量和有效态含量, 并计算 Fe/Mn、Ca/Al、Ca/Mg 和 SPAR 值。【结果】①与未火烧土壤相比, 堆烧后土壤 pH、有效 K、有效 Ca 含量和 Ca/Mg 值分别显著提高了 3.19%、50.83%、56.13% 和 28.01%。②火堆中心处的土壤质量含水量、有机质、全 C 和全 N 含量分别显著降低了 14.66%、15.90%、19.97% 和 17.25%, 而土壤 Ca/Al 值显著提高了 107.01%; 火堆边缘处的土壤质量含水量、有机质、全 C 含量和 Ca/Al 值与未火烧土壤无显著差异。③火堆中心处的 0~5 cm 土壤有效 P 含量显著提高了 67.88%, 而堆烧对 5~10 cm 土壤有效 P 含量无显著影响。④堆烧对土壤全量 P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Al、Na、Fe/Mn 和 SPAR 值均无显著影响。⑤主成分分析结果显示, 堆烧显著改变了 0~5 cm 土壤性质, 且土壤全 C 是驱动土壤性质变化的主要因子。【结论】堆烧在短期内提高了马尾松林土壤 P、K 和 Ca 元素的有效性, 且火干扰后的植被恢复措施应重点考虑火堆中心位置。

**关键词:** 堆烧; 马尾松; 土壤养分; 有效态; 元素比值

中图分类号: S714.8 文献标识码: A 文章编号: 0564-3945(2024)05-1376-10

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2023092603

王 款, 梁诗强, 程刘涛, 姚 智, 满家瑞, 胡亚林, 王玉哲. 马尾松采伐剩余物堆烧对土壤养分元素含量的短期影响 [J]. 土壤通报, 2024, 55(5): 1376-1385

WANG Kuan, LIANG Shi-qiang, CHENG Liu-tao, YAO Zhi, MAN Jia-rui, HU Ya-lin, WANG Yu-zhe. Effects of Pile Burning on Soil Nutrient Contents in a Harvested *Pinus massoniana* Plantation[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(5): 1376-1385

**【研究意义】**马尾松 (*Pinus massoniana*) 是我国南方重要的先锋树种和速生用材树种, 具有耐干旱耐贫瘠、生长快等特点。第九次全国森林资源清查结果显示, 我国马尾松林面积达  $8.04 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>。然而, 自 1982 年在我国首次发现松材线虫病以来, 包括马尾松在内的乡土松种染病面积不断加大<sup>[1]</sup>。就地烧除马尾松疫木采伐剩余物是防止松材线虫病蔓延的有效措施<sup>[2]</sup>。在皆伐后的马尾松林采伐迹地, 一般采用漫烧的方式清理林地中的马尾松疫木采伐剩余物<sup>[3]</sup>; 而在天然林或混交林中, 为避免伤害健康松树和其他阔叶树种, 多采用堆烧的方式将马尾松疫木采伐剩余物就地烧除。堆烧是一种经济有效的疫

木处理措施, 可以控制森林病虫害的传播, 是森林管理者进行森林保护和维持森林健康的重要手段<sup>[4]</sup>。

**【前人研究进展】**土壤养分是评价土壤肥力和影响植物生长状况的重要因子<sup>[5]</sup>。研究表明, 火烧能在短期内显著改变土壤全量和有效态养分含量。申航等<sup>[6]</sup>在针阔混交林研究发现, 低强度火烧一周后土壤全氮 (N) 和全磷 (P) 显著下降。Magallanes 等<sup>[7]</sup>研究发现, 低至中等强度火烧 1 d 后, 热带高草原土壤有效态钙 (Ca)、钾 (K) 和镁 (Mg) 含量显著增加, 而土壤有效铝 (Al) 含量显著降低。Fernández-García 等<sup>[8]</sup>研究不同强度野火对地中海松林土壤性质的短期影响, 结果发现中等和高强度火

收稿日期: 2023-09-26; 修订日期: 2024-02-27

基金项目: 福建农林大学科技创新专项基金项目 (KFb22036XA) 和杰出青年科研人才计划项目 (xjq202106) 资助

作者简介: 王 款 (1998-), 男, 四川广安人, 硕士研究生, 从事森林土壤质量评价研究。E-mail: wangkuan0821@163.com

\*通讯作者: E-mail: wangyuzhe@fafu.edu.cn

烧后土壤有效 P 含量显著增加。火烧强度是影响火后土壤养分含量变化的关键因子<sup>[9]</sup>。有研究表明, 土壤有效 N 和 P 含量随火烧强度增加而增加<sup>[9-10]</sup>。在堆烧过程中, 火烧强度因火堆位置而异, 火烧强度从火堆中心到边缘逐渐降低<sup>[11]</sup>。Esquilín 等<sup>[12]</sup>在美国落基山脉松林的研究发现, 与未火烧土壤相比, 火堆中心和边缘处的土壤有效 N 含量显著升高; 火堆中心处的土壤有效 P 含量显著高于未火烧土壤, 而火堆边缘处的土壤有效 P 含量与未火烧土壤无显著差异。Johnson 等<sup>[13]</sup>在美国内华达州松林的研究发现, 堆烧后土壤有效 N 含量显著升高, 而火堆中心和边缘处的土壤有效 P 含量与未火烧土壤均无显著差异。土壤养分元素比值是表征土壤质量的重要指标, 如土壤 Ca/Al 能反映土壤肥力状况和环境胁迫 (如 Al 毒等) 程度<sup>[14]</sup>, 土壤 Ca/Mg 是表征土壤结构稳定性的间接指标<sup>[15]</sup>。铁 (Fe) 和 Mn 平衡在植物代谢中起重要作用, 土壤 Fe/Mn 能调控植物的健康和生长<sup>[16]</sup>。土壤钠 (Na) 和 K 吸附比 (SPAR) 能反映盐离子对粘土分散性的影响, 火烧后由于有机物矿化作用增加, SPAR 通常会增大<sup>[15]</sup>。研究土壤养分元素比值对于指导火干扰后初期林地生态系统恢复至关重要。目前国内外关于林火对土壤元素比值的影响研究多集中在土壤 C/N 和 N/P<sup>[17-18]</sup>, 对土壤其他养分元素比值的研究较少。【本研究切入点】由于燃烧条件和环境因子等条件的差异, 堆烧对土壤养分的影响表现出空间异质性。目前关于堆烧后不同火堆位置处的土壤养分状况尚不清楚。【拟解决的问题】本研究以中亚热带马尾松林采伐迹地为研究对象, 分析堆烧 1 d 后未火烧土壤和火后烧堆不同位置 (中心、边缘) 土壤 pH、质量含水量、有机质、全 C、养分元素 (N、P、K、Ca、Mg、Na、Fe、Mn 和 Al) 的全量和有效态含量及其比值的差异, 研究马尾松采伐剩余物堆烧对土壤养分有效性的影

响, 探究火烧后不同烧堆位置处的土壤养分特征, 旨在揭示中亚热带马尾松林火烧迹地土壤养分循环和地力维持机制, 以期为火烧干扰后马尾松林地土壤肥力保持和植被恢复制定科学的管理措施提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于福建省福州市罗源县国有林场 (119°32' E, 26°27' N), 属中亚热带季风气候, 温暖湿润, 雨量充沛, 年均气温 19.0℃, 年均降水量 1645.0 mm, 年均日照时间 1747.9 h, 年平均相对湿度 79%, 无霜期 296 d。试验地为 36 a 生马尾松人工林采伐迹地, 土壤类型为红壤, 土层厚度 80 cm, 坡度为 22°。林下植被主要有福建青冈 (*Cyclobalanopsis chungii*)、芒萁骨 (*Dicranopteris dichotoma*)、狗脊 (*Woodwardia japonica*)、桃金娘 (*Rhodomyrtus tomentosa*)、黄瑞木 (*Adinandra millettii*) 等。

### 1.2 试验设计

2022 年 2 月对试验地内的马尾松疫木进行皆伐, 将疫木树干运到专门场所进行处理后, 对林地内的马尾松采伐剩余物则进行堆烧处理。为避免地形差异等因素影响, 在同一坡向、相近坡度的位置分别设置 10 个形状、大小相似的火堆 (平均直径为 2.33 m)。可燃物由马尾松疫木采伐剩余物及其枯落物和其他少量杂木构成, 平均可燃物载量约为 11.32 kg m<sup>-2</sup>。于 2022 年 3 月 2 日对马尾松疫木采伐剩余物进行堆烧处理 (图 1), 火烧后产生的灰分量约为 481.48 g m<sup>-2</sup>。火堆不同位置, 即火堆中心 (以火堆中心为圆点, 半径 30 cm 范围)、火堆边缘 (火堆外缘以内 20~30 cm 范围) 和未火烧土壤 (距离火堆外缘 3~5 m) 代表不同火烧强度梯度, 每个梯



图 1 堆烧马尾松疫木采伐剩余物

Fig.1 The piled burnt residues of the nematode-infected harvest of *Pinus massoniana*

度有 10 个重复。

### 1.3 样品采集与分析

2022 年 3 月 3 日（堆烧 1 d 后），移除表面灰分后，在火堆不同位置和旁边未火烧处，按 0~5 cm 和 5~10 cm 分别进行 5 点均匀取样，之后按火烧强度混合为一份样品，火堆中心、火堆边缘和未火烧土壤各 10 个重复，共计 60 份土样。将土样运回实验室后，移除根、石砾等杂物后过 2 mm 筛。过筛后的土壤样品自然风干，用于测定土壤 pH、质量含水量、有机质、全 C 和养分元素的全量和有效态含量。

按水土比 2.5:1 混匀后，用 pH 计（Starter 3100，美国）测定土壤 pH；土壤有机质采用灼烧法（重量法）<sup>[19]</sup> 测定；土壤全 C 和全 N 含量采用元素分析仪（Vario ISOTOPE cube，德国）测定；土壤全 P 含量用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub> 消煮、钼锑抗比色法测定（LY/T 1232—1999）；用电感耦合等离子体发射光谱仪（PE Optima 8000，美国）测定土壤养分元素（K、Ca、Mg、Na、Fe、Mn、Al）全量；用 HCl-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提、钼锑抗比色法测定土壤有效 P 含量（LY/T 1233—1999）；参照 AB-DTPA 浸提法（1 mol L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub>-0.005 mol L<sup>-1</sup> DTPA）浸提，用 ICP-OES（PE Optima 8000，美国）测定土壤养分元

素（K、Ca、Mg、Na、Fe、Mn、Al）有效态含量。土壤 SPAR 的计算公式如下<sup>[20]</sup>：

$$SPAR = (Na + K) / (Ca + Mg)^{1/2} \quad (1)$$

式中，SPAR 为土壤钠钾吸附比（无量纲），Na、K、Ca 和 Mg 分别表示这四种元素的有效态含量（mg kg<sup>-1</sup>）。

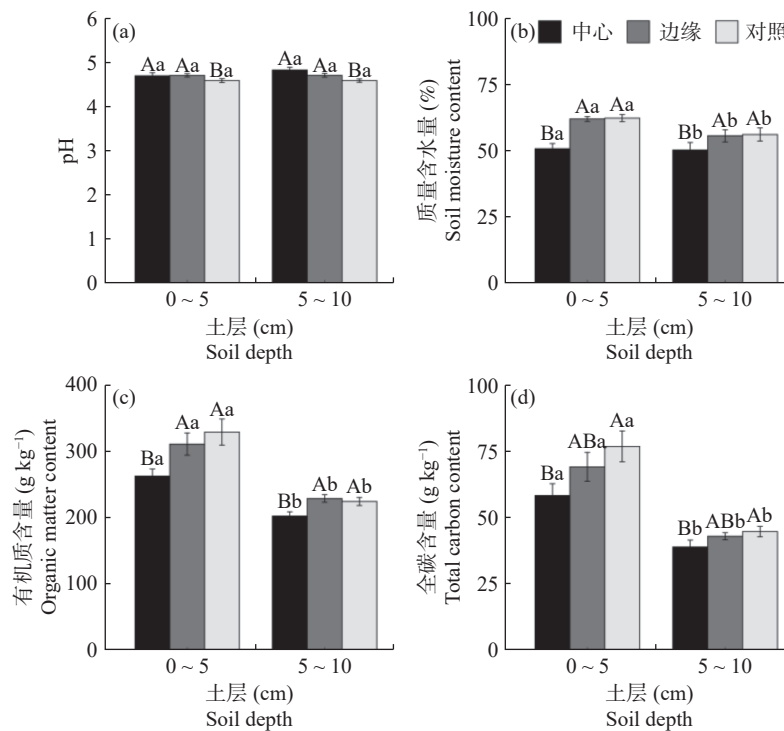
### 1.4 数据处理

采用双因素方差分析（Two-way ANOVA）检测烧堆位置、土层及其交互作用对土壤理化性质、养分元素全量和有效态含量及其比值的影响，采用最小显著性差异法（LSD）进行事后检验（ $\alpha = 0.05$ ）。对处理间差异显著的土壤因子进行主成分分析（PCA），按照特征值大于 1 的标准筛选主成分，确定驱动不同处理土壤性质差异的主要因子。所有统计分析及可视化均在 R（v4.1.1）中进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 采伐剩余物堆烧对土壤理化性质的影响

如图 2 所示，不同堆烧位置处的土壤 pH、质量含水量、有机质和全 C 含量存在显著差异（ $P < 0.05$ ），烧堆位置和土层的交互作用对土壤基本理化性质无显著影响（ $P > 0.05$ ）。在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层，火堆中心和火堆边缘土壤 pH 分别比未火



注：不同大写字母表示同一土层不同处理间存在显著差异（ $P < 0.05$ ），不同小写字母表示同一处理不同土层间存在显著差异（ $P < 0.05$ ）。下同。

图 2 堆烧对土壤 pH、质量含水量、有机质和全碳的影响

Fig.2 Effects of pile burning on soil pH, moisture content, organic matter and total carbon content

烧土壤显著升高了 3.78% 和 2.60% (图 2a); 堆烧对土壤质量含水量、有机质和全 C 的影响因火堆位置而异 (图 2b-d), 与未火烧土壤相比, 火堆中心处的土壤质量含水量、有机质和全 C 含量分别显著降低了 14.66%、15.90% 和 19.97%, 而火堆边缘处的土壤质量含水量、有机质和全 C 含量与未火烧土壤无显著差异 ( $P > 0.05$ )。不同土层质量含水量、有机质和全 C 含量存在显著差异 ( $P < 0.001$ ), 0~5 cm 土层质量含水量、有机质和全 C 含量显著高于 5~10 cm 土层。土壤 pH 在土层间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

## 2.2 采伐剩余物堆烧对土壤养分元素全量的影响

不同堆烧位置和土层的交互作用对土壤养分元

素全量无显著影响 ( $P > 0.05$ )。除土壤全 N 外, 堆烧对其他养分元素全量均无显著影响 (表 1), 说明土壤全 N 对堆烧的响应更为敏感。在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层, 火堆中心处的土壤全 N 含量比未火烧土壤显著降低了 17.25%; 相比未火烧土壤, 堆烧后的土壤全量 K、Ca、Mg、Fe、Mn 和 Al 含量呈增加趋势, 但差异均未达到显著性水平 ( $P > 0.05$ )。不同土层全量 N、P、K、Ca 和 Al 含量存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 其中 0~5 cm 土层全量 N、P 和 Ca 含量显著高于 5~10 cm 土层, 而 0~5 cm 土层全量 K 和 Al 含量显著低于 5~10 cm 土层。不同土层全量 Mg、Fe、Mn 和 Na 含量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

表 1 堆烧对土壤养分元素全量的影响( $n=10$ )

Table 1 Effects of pile burning on the total contents of soil nutrient elements ( $n=10$ )

土层 (cm)	位置	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	Na
Soil depth	Location	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )	(g kg <sup>-1</sup> )
0~5	中心	3.54 ± 0.22 Ba	0.50 ± 0.02 Aa	4.33 ± 0.19 Ab	0.56 ± 0.07 Aa	1.48 ± 0.06 Aa	11.00 ± 0.48 Aa	0.53 ± 0.16 Aa	31.12 ± 1.29 Ab	0.18 ± 0.01 Aa
	边缘	4.12 ± 0.28 ABa	0.52 ± 0.03 Aa	4.35 ± 0.18 Ab	0.55 ± 0.05 Aa	1.58 ± 0.08 Aa	11.56 ± 0.58 Aa	0.51 ± 0.08 Aa	31.81 ± 1.59 Ab	0.19 ± 0.01 Aa
	对照	4.53 ± 0.27 Aa	0.55 ± 0.02 Aa	4.07 ± 0.23 Ab	0.47 ± 0.05 Aa	1.48 ± 0.09 Aa	10.87 ± 0.72 Aa	0.41 ± 0.06 Aa	29.48 ± 1.49 Ab	0.18 ± 0.01 Aa
5~10	中心	2.52 ± 0.16 Bb	0.39 ± 0.03 Ab	4.62 ± 0.23 Aa	0.34 ± 0.04 Ab	1.61 ± 0.11 Aa	11.81 ± 0.83 Aa	0.47 ± 0.16 Aa	34.99 ± 2.11 Aa	0.20 ± 0.01 Aa
	边缘	2.74 ± 0.08 ABb	0.43 ± 0.02 Ab	4.58 ± 0.14 Aa	0.36 ± 0.03 Ab	1.57 ± 0.08 Aa	11.17 ± 0.56 Aa	0.39 ± 0.06 Aa	33.31 ± 1.55 Aa	0.19 ± 0.01 Aa
	对照	2.78 ± 0.12 Ab	0.41 ± 0.03 Ab	4.54 ± 0.20 Aa	0.30 ± 0.03 Ab	1.50 ± 0.13 Aa	10.94 ± 0.94 Aa	0.33 ± 0.05 Aa	33.08 ± 1.98 Aa	0.20 ± 0.03 Aa

注: 表中数据均以平均值 ± 标准误差表示。不同大写字母表示同一土层不同处理间存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 不同小写字母表示同一处理不同土层间存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

## 2.3 采伐剩余物堆烧对土壤养分元素有效态含量的影响

不同堆烧位置和土层的交互作用对土壤有效 P 存在显著影响 ( $P < 0.05$ ), 而对其余有效态养分元素含量均无显著影响 ( $P > 0.05$ ) (表 2)。堆烧对土壤有效态 P、K 和 Ca 含量有显著影响 ( $P < 0.05$ )。堆烧对土壤有效 P 的影响因土层而异 (图 3a), 在 0~5 cm 土层, 与未火烧土壤相比, 火堆中心处的土壤有效 P 含量显著提高了 67.88%, 而堆烧对 5~10 cm 土壤有效 P 含量没有显著影响 ( $P > 0.05$ )。在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层, 火烧后土壤有效态 K 和 Ca 含量显著提高了 50.83% 和

56.13% (图 3b-c); 火烧后 0~5 cm 和 5~10 cm 土壤有效态 K 和 Ca 含量显著高于未火烧土壤 ( $P < 0.05$ )。火烧后土壤有效态 Mg、Mn 和 Na 含量增加 (图 3d, 3f, 3h), 土壤有效态 Fe 和 Al 含量呈下降趋势 (图 3e, 3g), 但差异均未达到显著性水平 ( $P > 0.05$ )。不同土层土壤有效态 K、Ca、Mg、Fe、Mn 和 Al 含量存在显著差异 ( $P < 0.01$ ), 其中 0~5 cm 土层土壤有效态 K、Ca、Mg、Fe、Mn 含量显著高于 5~10 cm 土层, 而 0~5 cm 土壤有效态 Al 含量显著低于 5~10 cm 土层。不同土层有效态 P 和 Na 含量无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

表 2 火堆位置和土层对土壤有效态养分元素的双因素方差分析结果

Table 2 Two-way ANOVA results for the effects of pile location and soil layer on soil available nutrient elements

因素	ANOVA	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Al	Na
Factor									
位置	<i>F</i>	4.871	4.871	7.322	3.029	2.573	0.351	1.325	0.403
	<i>P</i>	0.011*	0.012*	0.001**	0.057	0.086	0.705	0.274	0.670
土层	<i>F</i>	0.654	38.508	41.298	72.395	8.233	20.380	44.525	2.460
	<i>P</i>	0.422	0.000***	0.000***	0.000***	0.005**	0.000***	0.000***	0.123
位置 × 土层	<i>F</i>	3.519	0.418	1.677	1.216	1.375	0.016	0.234	0.239
	<i>P</i>	0.037*	0.661	0.197	0.305	0.262	0.984	0.792	0.788

注: \*表示  $P < 0.05$ , \*\*表示  $P < 0.01$ , \*\*\*表示  $P < 0.001$ 。

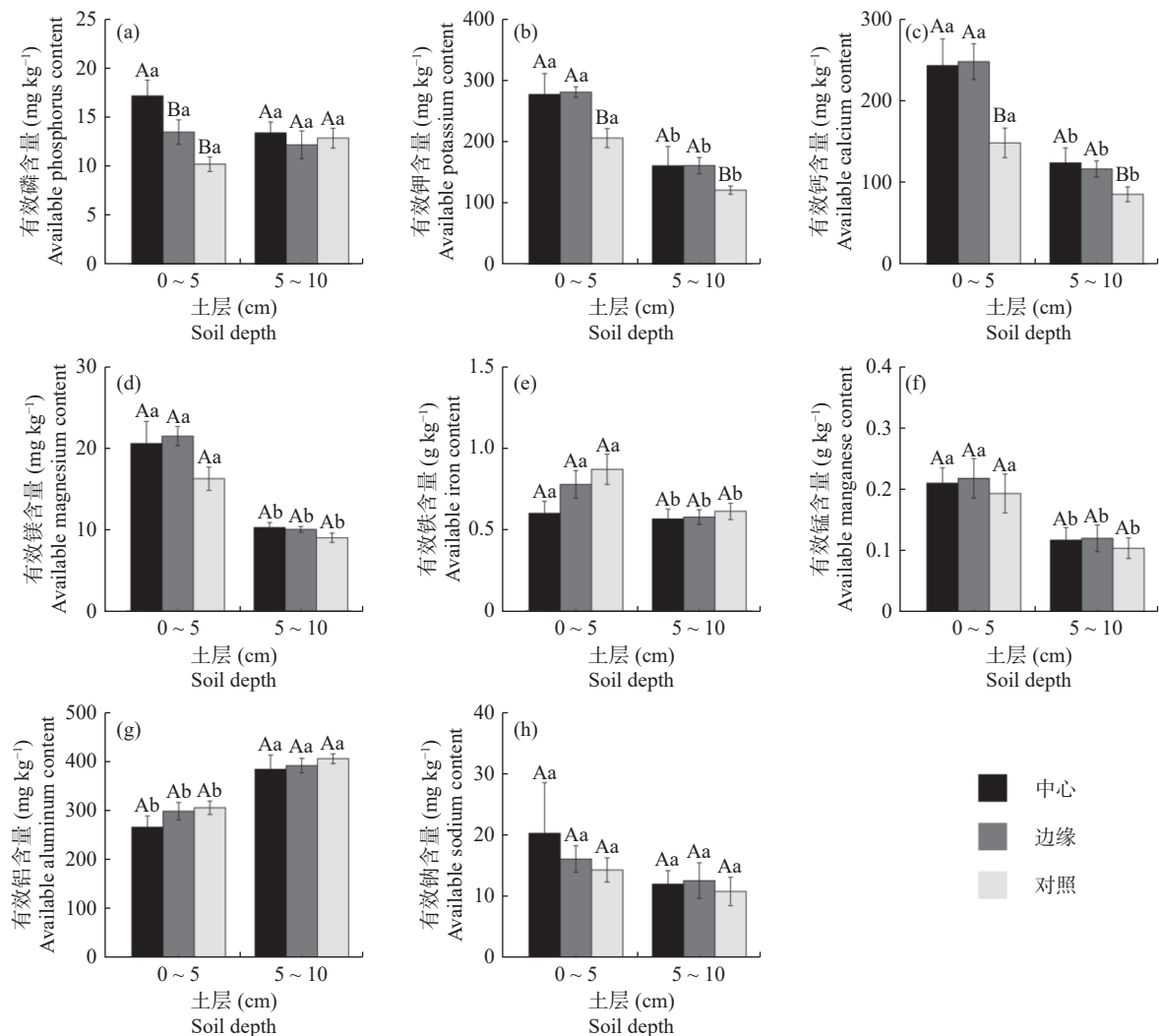


图 3 堆烧对土壤养分元素有效态含量的影响

Fig.3 Effect of pile burning on the available contents of soil nutrient elements

#### 2.4 采伐剩余物堆烧对土壤养分元素比值的影响

由图 4 可见, 堆烧对土壤 Ca/Al 和 Ca/Mg 值有显著影响 ( $P < 0.05$ )。在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层, 堆烧对土壤 Ca/Al 的影响因位置而异 (图 4b), 火堆中心处的土壤 Ca/Al 值较比未火烧土壤增加了 107.01%, 而火堆边缘处的土壤 Ca/Al 值与未火烧土壤无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 火堆中心和边缘处的土壤 Ca/Mg 比未火烧土壤分别显著增加了 30.14% 和 25.89% (图 4c)。堆烧对土壤 Fe/Mn 和 SPAR 值均无显著影响 ( $P > 0.05$ ) (图 4a, 4d)。不同土层土壤 Ca/Al 和 SPAR 值存在显著差异 ( $P < 0.001$ ), 0~5 cm 土壤 Ca/Al 和 SPAR 值均显著高于 5~10 cm 土壤。不同土层 Fe/Mn 和 Ca/Mg 值无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

#### 2.5 采伐剩余物堆烧对马尾松林土壤性质的影响分析

主成分分析结果表明, 堆烧后土壤性质发生了

显著改变 (图 5)。如表 3 所示, 在 0~5 cm 和 5~10 cm 土层, 主成分 1、2 和 3 的累计贡献率量均达到大于 85%, 说明前三个主成分 (P1、P2 和 P3, 表 3 和表 4) 可以代表土壤性质的绝大部分信息。在 0~5 cm 土层, 前三个主成分共同解释了总方差的 85.17%, 前两轴各占 46.63% 和 23.78% (表 3)。从图 5a 可以看出, 第一轴区分了火堆中心处和未火烧土壤样本, 这是由于堆烧后土壤 pH 及有效 P、K 和 Ca 含量显著增加, 以及土壤质量含水量、有机质、全 C 和全 N 含量减少 (图 2, 图 3 和表 2)。土壤全 C 是导致火堆中心处和未火烧土壤差异的关键因子。PC2 主要与土壤有效态 K 含量和 Ca/Al 值变化有关。在 5~10 cm 土层, 前三个主成分共同解释了总方差的 85.62%。前两轴分别占 50.32% 和 26.30% (表 3), 主要与土壤有机质、pH 值和有效 P 含量的变化有关, 但不同处理间土壤样本无明显分离

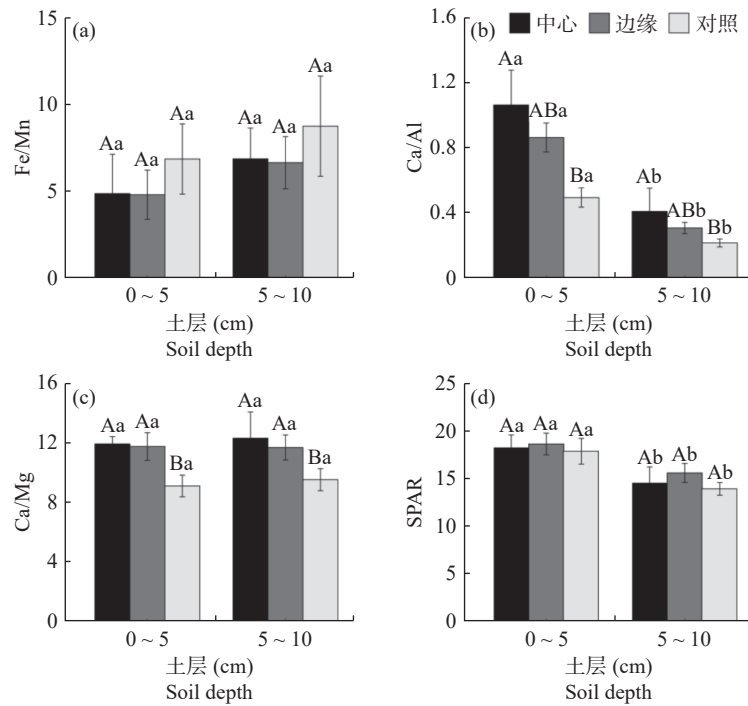
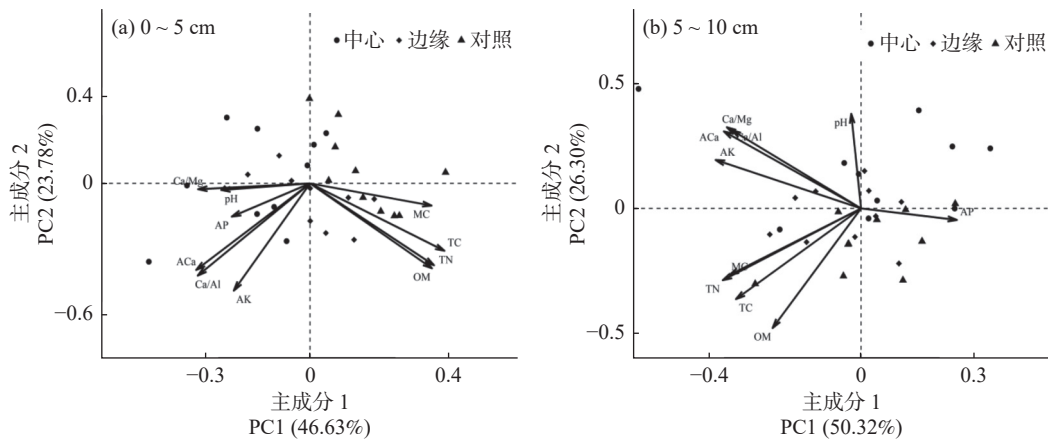


图 4 堆烧对土壤有效态养分元素比值的影响

Fig.4 Effect of pile burning on the ratios of soil available nutrients



注:MC: 质量含水量; OM: 有机质; TC: 全碳; TN: 全氮; AP: 有效磷; AK: 有效钾; Aca: 有效钙; Ca/Al: 有效钙/有效铝; Ca/Mg: 有效钙/有效镁。实心圆、菱形和三角形分别代表火堆中心、火堆边缘和未火烧对照土壤样本。

图 5 土壤理化性质和养分元素的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis of soil physiochemical properties and nutrients

表 3 各主成分特征值、方差占比和累计贡献量

Table 3 Eigenvalue, variance proportion and cumulative contribution of each principal component

土层 (cm) Soil depth	参量 Parameter	主成分 Principal component									
		PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7	PC8	PC9	PC10
0 ~ 5	特征值	4.6630	2.3783	1.4761	0.5505	0.3886	0.2573	0.1737	0.0561	0.0403	0.0161
	方差占比 (%)	46.63	23.78	14.76	5.51	3.89	2.57	1.74	0.56	0.40	0.16
	累计贡献量 (%)	46.63	70.41	85.17	90.68	94.57	97.14	98.88	99.44	99.84	100
5 ~ 10	特征值	5.0322	2.6296	0.9000	0.6621	0.3231	0.1807	0.1269	0.0686	0.0572	0.0196
	方差占比 (%)	50.32	26.30	9.00	6.62	3.23	1.81	1.27	0.69	0.57	0.19
	累计贡献量 (%)	50.32	76.62	85.62	92.24	95.47	97.28	98.55	99.24	99.81	100

表 4 前三个 PCA 主成分土壤因子载荷系数

Table 4 Soil parameter loadings of the first three principal components of PCA

土壤因子 Soil parameter	0 ~ 5 cm			5 ~ 10 cm		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
pH	-0.255	-0.031	<b>-0.568</b>	-0.026	0.379	<b>0.687</b>
MC	0.349	-0.102	-0.243	-0.346	-0.267	0.182
OM	0.350	-0.389	-0.036	-0.233	<b>-0.480</b>	0.056
TC	0.386	-0.309	-0.020	-0.330	-0.364	-0.010
TN	0.356	-0.375	-0.113	-0.365	-0.288	0.072
AP	-0.225	-0.152	<b>0.631</b>	0.253	-0.047	<b>-0.538</b>
AK	-0.219	<b>-0.491</b>	0.110	-0.383	0.194	-0.233
ACa	-0.328	-0.396	-0.101	-0.362	0.308	-0.073
Ca/Al	-0.323	<b>-0.423</b>	0.013	-0.341	0.314	-0.369
Ca/Mg	-0.321	-0.027	<b>-0.428</b>	-0.354	0.325	-0.030

注: MC: 质量含水量; OM: 有机质; TC: 全碳; TN: 全氮; AP: 有效磷; AK: 有效钾; Aca: 有效钙; Ca/Al: 有效钙/有效铝; Ca/Mg: 有效钙/有效镁。荷载系数为正表示变量与该主成分为正相关关系, 反之。粗体表示最高的荷载系数(荷载系数绝对值大于 0.4)。

(表 4, 图 5b), 这表明堆烧对 5 ~ 10 cm 土壤性质无显著影响。

### 3 讨论

#### 3.1 采伐剩余物堆烧对土壤理化性质的影响

火烧后由于林地植被覆盖减少以及黑炭等吸热燃烧产物的累积, 引起地表温度升高, 从而导致土壤含水量发生改变<sup>[21]</sup>。本研究发现, 火堆中心处的土壤质量含水量显著降低, 这是由于火堆中心处燃烧时产生的高温导致土壤水分蒸发引起的。火后土壤 pH 显著升高, 这与 Johnson 和 Johnson<sup>[16]</sup>的研究结果一致, 一方面是由于有机质燃烧过程中产生了大量碱性化合物, 另一方面有机物的氧化过程消耗了土壤中的部分有机酸, 从而导致火后土壤 pH 升高。土壤有机质是土壤养分的重要来源<sup>[22]</sup>, 燃烧过程会直接消耗土壤有机质, 同时释放出有机质中的养分元素, 土壤有机质损失量和养分释放量取决于火烧强度<sup>[23]</sup>。本研究发现堆烧后火堆中心处的土壤有机质含量显著低于未火烧土壤, 而火堆边缘处的土壤有机质含量与未火烧土壤无显著差异, 这是由于燃烧过程中火堆中心处温度比边缘处高, 导致更多的土壤有机质热解损失。曾素平等<sup>[24]</sup>研究也发现, 亚热带 4 种次生林土壤有机质含量随火烧强度的增大而减少。此外, 火堆中心处的土壤全 C 含量显著低于未火烧土壤, 这与 Esquilín 等<sup>[12]</sup>和 Johnson 等<sup>[13]</sup>的研究结果一致, 可能是由于火烧引起微生物和植物根系的死亡以及土壤中有机质的热解损失引起的。

#### 3.2 采伐剩余物堆烧对土壤养分元素含量的影响

前人研究发现土壤全 N 含量对火烧的响应与火烧强度有关, 高强度火烧能导致土壤全 N 含量显著

降低<sup>[25]</sup>, 而低强度火烧后土壤全 N 含量无显著变化<sup>[26]</sup>, 或增加<sup>[27]</sup>。本研究中, 火堆中心处的土壤全 N 含量显著低于未火烧土壤, 而火堆边缘处的土壤全 N 含量与未火烧土壤无显著差异, 这与 Johnson 等<sup>[13]</sup>的研究结果一致, 可能是由于火堆中心处的火烧强度高于火堆边缘处。而 Ross 等<sup>[28]</sup>在美国圆柏林的研究发现, 堆烧后短期内 0 ~ 2 cm 土壤全 N 含量显著高于未火烧土壤。由于火烧对土壤 N 库的影响受火烧强度、生态系统类型、研究时间尺度等多方面因素的综合作用, 因而具有很大不确定性<sup>[29]</sup>。

土壤有效态养分是表征土壤肥力的重要指标, 对植物生长有显著影响<sup>[30]</sup>。有研究报道, 计划火烧可以提高土壤养分的有效性<sup>[31]</sup>。本研究结果表明, 火后 0 ~ 5 cm 土壤有效 P 含量升高, 可能是由于燃烧过程中有机质矿化的直接效应和堆烧后 pH 升高的间接效应, 从而导致了土壤有效 P 含量增加<sup>[32]</sup>。堆烧对 5 ~ 10 cm 土壤有效 P 含量无显著影响, 这说明堆烧对土壤有效 P 的影响与土层有关, 可能是因为火堆边缘处和下层土壤的温度较低, 因而对土壤有效 P 含量无显著影响。而申航<sup>[6]</sup>等在亚热带针阔混交林发现, 火烧后一周 0 ~ 10 cm 土壤有效 P 含量无显著变。本研究还发现, 堆烧后土壤有效态 K 和 Ca 含量显著增加, 这与 Chungu 等<sup>[33]</sup>的研究结果一致。这是由于火烧后灰分的输入向表层土壤中释放了更多养分元素, 从而增加了土壤有效态养分含量。本研究中堆烧后土壤有效态 Fe、Mn 和 Al 含量与未火烧土壤无显著差异。Johnson 和 Johnson<sup>[16]</sup>在美国内华达州森林研究结果发现, 松树堆烧后土壤有效态 Mn 含量显著增加, 这是由于森林凋落物中的 Mn 含量较高, 并以结晶或有机物分解的形式从灰烬中释放。目前火烧对土壤 Fe、Mn 和 Al 等微量元素的

影响尚不清楚, 还需要更多的研究证实。本研究表明, 堆烧后土壤 P、K 和 Ca 的有效性显著增加, 提高了马尾松林土壤肥力, 为火后初期植被恢复提供了有利条件。

### 3.3 采伐剩余物堆烧对土壤养分元素比值的影响

土壤养分元素比值是表征土壤质量状况(如土壤结构稳定性等)的重要指标<sup>[16, 20]</sup>。土壤 Ca/Mg 能反映土壤结构特征, 由于  $Mg^{2+}$  的水合半径较大,  $Ca^{2+}$  的絮凝能力高于  $Mg^{2+}$ <sup>[15]</sup>, 所以土壤中较多的  $Ca^{2+}$  更有利于土壤结构稳定。本研究发现, 堆烧显著提高了表层土壤的 Ca/Mg 值。这与张秋霞等<sup>[34]</sup>关于马尾松采伐迹地漫烧处理的研究结果一致, 这是由于火烧后有效态 Ca 含量的增加程度大于有效态 Mg。而 Pereira 等<sup>[15]</sup>在草原野火的研究中发现, 火烧后土壤 Ca/Mg 值显著降低, 这是由于火烧对土壤有效态 Mg 和 Ca 含量的相对影响因生态系统而异。土壤 Ca/Mg 值还能影响其他养分元素(如 N、P 等)的有效性<sup>[35-36]</sup>。土壤中溶解态 Al 对植物具有毒性, 其含量过高会抑制植物养分吸收能力而限制植物生长。土壤中的 Ca 可增强植物抗 Al 毒能力, 因此, 土壤中的 Ca 较多有利于植物生长<sup>[37]</sup>。有研究表明, 温带樟子松林火烧 1 天后土壤 Ca/Al 值显著升高, 这是由于火烧后土壤有效态 Ca 增加程度高于 Al<sup>[14]</sup>。本研究中, 随着火烧强度的增加, 土壤 Ca/Al 值逐渐升高, 火堆中心土壤 Ca/Al 值显著高于未火烧土壤。这是由于火堆中心处较高强度火烧降低了土壤中有效态 Al, 同时提高了 Ca 的有效性, 说明堆烧后不同位置土壤养分含量具有异质性, 其对火后植被恢复的影响还有待研究。Na 吸附比(SAR)用于确定盐对粘土分散的影响。Na 和 K 是具有高分散土壤粘土能力的元素<sup>[38]</sup>, 有研究表明, 火烧后 Na 和 K 含量显著增加, 对土壤结构稳定性有显著影响<sup>[39]</sup>。也有研究发现, 低强度火烧后土壤 SPAR 值无显著变化<sup>[15]</sup>。本研究中, 土壤 SPAR 对堆烧响应不敏感, 这可能是由于 Ca 和 Mg 含量显著增加, 而 Na 和 K 含量无显著变化, 从而导致 SPAR 值无显著变化。本研究表明, 适宜的火烧强度可改善土壤养分状况, 今后应深入探究火烧强度(如烧堆大小和可燃物种类等)对土壤养分元素有效性及其生物地球化学循环的影响, 为森林可燃物管理措施和土壤肥力维持提供理论支持。

## 4 结论

马尾松疫木采伐剩余物堆烧显著改变了火烧后

表层土壤理化性质和养分元素含量, 火烧后土壤有效态 P、K 和 Ca 含量显著提高; 而土壤有效态 Mg、Na、Fe、Mn 和 Al 含量无显著变化。堆烧对马尾松采伐迹地土壤有机质、全 C、全 N 和 Ca/Al 的影响因火堆位置而异, 主要影响在火堆中心。

本研究阐明了堆烧马尾松疫木采伐剩余物对土壤结构稳定性和养分有效性的短期影响, 发现堆烧短期内可改善马尾松林土壤养分状况, 本研究中的烧堆大小和可燃物载量可为未来森林可燃物管理提供参考。未来应长期监测土壤养分的动态变化以及植被恢复状况, 探究马尾松火烧迹地土壤养分有效性与植被恢复特征的耦合机制。

### 参考文献:

- [1] 叶建仁. 松材线虫病在中国的流行现状, 防治技术与对策分析[J]. 林业科学, 2019, 55(9): 1-10.
- [2] 朱宁波. 《松材线虫病防治技术方案》和《松材线虫病疫区和疫木管理办法》重新修订发布[J]. 中国森林病虫, 2019, 38(1): 47-48.
- [3] 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库的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7198-7207.
- [4] Arocena J M, Opio C. Prescribed fire-induced changes in properties of sub-boreal forest soils[J]. *Geoderma*, 2003, 113(1-2): 1-16.
- [5] 陈亚男, 庄 媛, 闫瑞瑞, 等. 南方长期不同土地利用方式下土壤肥力变化特征——以湖北省长阳县火烧坪乡为例[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(1): 188-200.
- [6] 申 航, 王云琦, 王玉杰, 等. 火烧对重庆缙云山土壤化学性质的影响[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(3): 52-59.
- [7] Magallanes S R S, Giongo M, Carvalho E V, et al. Immediate effects of prescribed burning on chemical properties of the *Cerrado* soil[J]. *Floresta e Ambiente*, 2020, 27(3): e20180253.
- [8] Fernández-García V, Marcos E, Fernández-Guisuraga J M, et al. Impact of burn severity on soil properties in a *Pinus pinaster* ecosystem immediately after fire[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2019, 28(5): 354-364.
- [9] 孔健健, 杨 健. 火烧对中国东北部兴安落叶松林土壤性质和养分元素有效性的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(11): 2837-2843.
- [10] Heydari M, Rostamy A, Najafi F, et al. Effect of fire severity on physical and biochemical soil properties in Zagros oak (*Quercus brantii* Lindl.) forests in Iran[J]. *Journal of Forestry Research*, 2017, 28(1): 95-104.
- [11] Fornwalt P J, Rhoades C C. Rehabilitating slash pile burn scars in upper montane forests of the Colorado Front Range[J]. *Natural Areas Journal*, 2011, 31(2): 177-182.
- [12] Esquilín A E J, Stromberger M E, Massman W J, et al. Microbial community structure and activity in a Colorado Rocky Mountain forest soil scarred by slash pile burning[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,



- 2007, 39(5): 1111 – 1120.
- [ 13 ] Johnson B G, Johnson D W, Miller W W, et al. The effects of slash pile burning on soil and water macronutrients[J]. *Soil Science*, 2011, 176(8): 413 – 425.
- [ 14 ] Francos M, Úbeda X, Pereira P. Impact of bonfires on soil properties in an urban park in Vilnius (Lithuania)[J]. *Environmental Research*, 2020, 181: 108895.
- [ 15 ] Pereira P, Cerda A, Martín 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.
- [ 16 ] Johnson B G, Johnson D W. The influence of slash pile burning on meadow and upland forest soil micronutrients in the Sierra Nevada Mountains, United States[J]. *Soil Science*, 2019, 184(3): 78 – 86.
- [ 17 ] Rhoades C C, Fegél T S, Zaman T, et al. Are soil changes responsible for persistent slash pile burn scars in lodgepole pine forests?[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 490: 119090.
- [ 18 ] Xu Z, Zhao H, Wang G, et al. Inter-month nutrients dynamic and plant growth in *Calamagrostis angustifolia* community and soil after different burning seasons[J]. *Fire*, 2023, 6(10): 405.
- [ 19 ] 周建青, 徐爱列. 青海地区泥炭土壤中有机质含量测定方法的比较 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(36): 20696 – 20697 + 20700.
- [ 20 ] Sarah P. Soil sodium and potassium adsorption ratio along a Mediterranean–arid transect[J]. *Journal of Arid Environments*, 2004, 59(4): 731 – 741.
- [ 21 ] Mott C M, Hofstetter R W, Antoninka A J. Post-harvest slash burning in coniferous forests in North America: A review of ecological impacts[J]. *Forest Ecology and Management*, 2021, 493: 119251.
- [ 22 ] 兰道云, 毕华兴, 赵丹阳, 等. 晋西黄土区不同密度油松人工林保育土壤功能评价 [J]. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 189 – 196.
- [ 23 ] Ando K, Shinjo H, Noro Y, et al. Short-term effects of fire intensity on soil organic matter and nutrient release after slash-and-burn in Eastern Province, Zambia[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 60(2): 173 – 182.
- [ 24 ] 曾素平, 刘发林, 赵梅芳, 等. 火干扰强度对亚热带四种森林类型土壤理化性质的影响 [J]. *生态学报*, 2020, 40(1): 233 – 246.
- [ 25 ] 左 壮, 张 韪, 崔晓阳. 火烧对兴安落叶松林土壤氮形态和含量的初期影响 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2024, 48(1): 147 – 154.
- [ 26 ] Moghaddas E E Y, Stephens S L. Thinning, burning, and thin-burn fuel treatment effects on soil properties in a Sierra Nevada mixed-conifer forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 250(3): 156 – 166.
- [ 27 ] Alcañiz M, Outeiro L, Francos M, et al. Long-term dynamics of soil chemical properties after a prescribed fire in a Mediterranean forest (Montgrí Massif, Catalonia, Spain)[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 572: 1329 – 1335.
- [ 28 ] Ross M R, Castle S C, Barger N N. Effects of fuels reductions on plant communities and soils in a Piñon-juniper woodland[J]. *Journal of Arid Environments*, 2012, 79: 84 – 92.
- [ 29 ] Agbeshie A A, Abugre S, Atta-Darkwa T, et al. A review of the effects of forest fire on soil properties[J]. *Journal of Forestry Research*, 2022, 33(5): 1 – 23.
- [ 30 ] 杨予静, 李昌晓, 张 晔, 等. 水淹-干旱交替胁迫对湿地松幼苗盆栽土壤营养元素含量的影响 [J]. *林业科学*, 2013, 49(2): 55 – 65.
- [ 31 ] Scharenbroch B C, Nix B, Jacobs K A, et al. Two decades of low-severity prescribed fire increases soil nutrient availability in a Midwestern, USA oak (*Quercus*) forest[J]. *Geoderma*, 2012, 183: 80 – 91.
- [ 32 ] Certini G. Effects of fire on properties of forest soils: a review[J]. *Oecologia*, 2005, 143(1): 1 – 10.
- [ 33 ] Chungu D, Ng’andwe P, Mubanga H, et al. Fire alters the availability of soil nutrients and accelerates growth of *Eucalyptus grandis* in Zambia[J]. *Journal of Forestry Research*, 2020, 31(5): 1637 – 1645.
- [ 34 ] 张秋霞, 吴晓生, 严 强, 等. 森林火烧黑炭对闽楠幼苗生长及林地土壤养分的影响 [J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(5): 459 – 465.
- [ 35 ] Favaretto N, Norton L D, Johnston C T, et al. Nitrogen and phosphorus leaching as affected by gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(2): 575 – 585.
- [ 36 ] Manimel Wadu M C W, Michaelis V K, Kroeker S, et al. Exchangeable calcium/magnesium ratio affects phosphorus behavior in calcareous soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(6): 2004 – 2013.
- [ 37 ] 杜大俊, 张秋霞, 任丽红, 等. 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 [J]. *水土保持学报*, 2019, 33(5): 157 – 162.
- [ 38 ] Gimeno - García E, Andreu V, Rubio J L. Changes in organic matter, nitrogen, phosphorus and cations in soil as a result of fire and water erosion in a Mediterranean landscape[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(2): 201 – 210.
- [ 39 ] Pils J R V, Laird D A, Evangelou V P. Role of cation demixing and quasicrystal formation and breakup on the stability of smectitic colloids[J]. *Applied Clay Science*, 2007, 35(3-4): 201 – 211.

## Effects of Pile Burning on Soil Nutrient Contents in a Harvested *Pinus massoniana* Plantation

WANG Kuan<sup>1</sup>, LIANG Shi-qiang<sup>2</sup>, CHENG Liu-tao<sup>3</sup>, YAO Zhi<sup>3</sup>, MAN Jia-rui<sup>3</sup>, HU Ya-lin<sup>1</sup>, WANG Yu-zhe<sup>1\*</sup>

(1. College of JunCao Science and Ecology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Luoyuan State-owned Forest Farm, Luoyuan 350600, China; 3. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** [Objective] The aim was to investigate the short-term effect of piled burning nematode-infected harvest residues of *Pinus massoniana* on soil nutrient availability, in order to provide insightful information for maintaining soil fertility and enhancing vegetation restoration in the burnt plantation. [Method] Soils were collected at 0 ~ 5 and 5 ~ 10 cm depth from the unburnt area and different positions (center and edge) of the post-fire piles one day after burning in a recently harvested *P. massoniana* in mid-subtropical China. Soil pH, moisture content, organic matter, total carbon (C), the total and available contents of (N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, and Al) were measured, and Fe/Mn, Ca/Al, Ca/Mg, and SPAR were also calculated. [Result] ① Soil pH, available K and Ca concentrations, and Ca/Mg in the burnt area were significantly increased by 3.19%, 50.83%, 56.13%, and 28.01% compared to the unburnt control. ② Soil moisture, organic matter, total C and total N concentrations in the center of the piles were significantly reduced by 14.66%, 15.90%, 19.97%, and 17.25%, respectively. However, the burning increased soil Ca/Al ratio by 107.01%. There was no significant difference in soil moisture, organic matter, and total C concentrations as well as the Ca/Al ratio between the edge of the burnt pile and the control. ③ Soil available P concentration at 0 ~ 5 cm depth in the center of the pile was significantly increased by 67.88% than that of the unburnt control, while no significant change was observed in the 5 ~ 10 cm soil. ④ Pile burning had no significant effect on soil total P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, and Al concentrations, and Fe/Mn and SPAR. ⑤ The principal component analysis showed that pile burning changed soil properties at the 0 - 5 cm but not the 5 - 10 cm soil layer, and soil total C was the key factor driving the change in soil properties. [Conclusion] Pile burning improved the availabilities of P, K and Ca in recently harvested *P. massoniana* plantations in the short term, and the center of piles should be taken into account in maintaining forest fertility and restoring vegetation.

**Key words:** Pile burning; *Pinus massoniana*; Soil nutrient; Availability; Element ratio

[责任编辑: 张玉玲]