

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2023.09.024

引用格式:冉益倩,周俊,张茜彧,等.火烧强度对西南亚热带林地土壤理化性质的影响[J].草地学报,2023,31(9):2796—2804

RAN Yi-qian, ZHOU Jun, ZHANG Xi-yu, et al. Effects of Burning Intensity on Soil Chemical and Physical Properties in Southwest subtropical Forests[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(9): 2796—2804

## 火烧强度对西南亚热带林地土壤理化性质的影响

冉益倩<sup>1,2</sup>, 周俊<sup>2\*</sup>, 张茜彧<sup>2</sup>, 范建容<sup>2</sup>, 李孝龙<sup>2</sup>, 马月伟<sup>1\*</sup>

(1. 西南林业大学地理与生态旅游学院, 云南昆明 650224; 2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610299)

**摘要:**为阐明火烧强度对西南亚热带山地森林土壤理化性质的影响,本研究通过采集和分析四川西昌“3·30”火烧迹地不同火烧程度(未过火、低度、中度和重度)的土壤,发现重度火烧极显著增加了土壤容重;火烧显著增加了土壤速效磷和速效钾含量,显著降低了土壤全氮和碱解氮含量,但是对土壤pH值、有机碳、全钙、全镁、全钾和全磷含量无显著影响。通过对比分析火烧对不同纬度林地土壤理化性质的影响,发现火烧对亚热带地区森林土壤的影响与北方存在差异,主要表现为火烧后进入土壤的碱基离子和未完全燃烧的有机物相对较少,导致有机碳、全钙、全镁和全钾含量的变化不显著,而高温导致碱解氮含量显著降低。本文的结果不仅凸显了林火对不同气候条件下森林土壤性质影响的差异,而且可为亚热带地区火烧迹地植被恢复过程中的养分管理提供科学依据。

**关键词:**森林火灾;土壤养分循环;土壤有机碳;有效养分;有机质层

中图分类号:C1606

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2023)09-2796-09

### Effects of Burning Intensity on Soil Chemical and Physical Properties in Southwest subtropical Forests

RAN Yi-qian<sup>1,2</sup>, ZHOU Jun<sup>2\*</sup>, ZHANG Xi-yu<sup>2</sup>, FAN Jian-rong<sup>2</sup>, LI Xiao-long<sup>2</sup>, MA Yue-wei<sup>1\*</sup>

(1. College of geography and ecological tourism, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan Province 650224, China;

2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan Province 610299, China)

**Abstract:** Wildfire is an important factor of impacting soil chemical and physical properties. Knowledge of the effects of burning intensity on soil organic carbon and nutrients in southwest subtropical forests of China remains scarce, although forest fires occur frequently in this region where soil properties are significantly different from north areas. To clarify the variations in soil organic carbon and nutrients with burning intensity, we collected soil encountered different burning intensities (unburned, low, medium and high intensity of burning) in the “2020. 3. 30 Forest Fire” area in Xichang City, Sichuan Province, southwest China in late March 2021. Results showed that the concentration of available phosphorus (P) and potassium (K) in soil significantly increased with burning intensity, although pH and the concentration of total calcium, magnesium, K and P, organic carbon (C) and inorganic and organic P did not change significantly after one year of the fire. Fire disturbance significantly reduced the concentration of soil total and available N. High intensity of fire disturbance significantly increased bulk density (BD) of soil, although BD did not change significantly under low and medium intensity of burning. Some of the above variations caused by burning differed from those in north forests with a lower temperature. The differences were likely ascribed to the different climates and the thickness of organic horizons between subtropical and northern forests. The results not only highlight the difference in the effects of fire on soil properties between subtropical and north forests, but also support the soil nutrient management during vegetation restoration in burned areas of subtropical forests.

收稿日期:2023-04-20;修回日期:2023-06-17

基金项目:中国科学院西部青年学者项目;四川省科技计划(2021YJ0375);中国科学院成都山地所青年基金项目(SDS-QN-1904)资助

作者简介:冉益倩(1999-),女,土家族,贵州德江人,硕士研究生,主要从事山地养分循环研究,E-mail:ryyq9977@163.com; \*通信作者  
Author for correspondence, E-mail:zhoujun@imde.ac.cn; mayuewei 007@126.com

**Key words:** Forest fire; Soil nutrient cycling; Soil organic carbon; Available nutrients; Organic horizon

森林生态系统是陆地最重要的碳库,但常受到火烧的扰动<sup>[1-2]</sup>。与1984年之前相比,近四十年来全球森林过火面积增加了一倍<sup>[3-4]</sup>。尽管林火是pH值、容重、养分含量及其有效性等土壤理化性质的重要影响因素<sup>[5-9]</sup>,但上述指标随火烧程度的变化趋势和程度仍存在较大争议。例如,部分研究发现火烧使土壤无机元素含量升高<sup>[10-12]</sup>或有机酸变性<sup>[13]</sup>,从而导致土壤pH值升高,但是,也有研究发现pH值在火烧后保持不变<sup>[14]</sup>。同样,林火干扰导致土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)含量升高、不变和降低的研究结果也大量存在<sup>[15-17]</sup>。尽管多个研究发现火烧使土壤氮(Nitrogen, N)直接挥发,导致土壤全氮(Total nitrogen, TN)含量显著降低<sup>[18]</sup>,但也有研究发现轻度和中度火烧后土壤TN含量并未显著降低。相反,由于轻度和中度火烧导致养分随灰分物质进入土壤,因此,土壤TN含量增加<sup>[19]</sup>。此外,还有研究发现尽管火烧未明显改变土壤磷(Phosphorus, P)的总量,但可导致土壤有效P含量升高<sup>[20]</sup>。上述不一致的研究结果基于不同气候区的火烧迹地得到,表明林火对不同气候区土壤性质的影响可能显著不同,但其中的差异和机制尚待揭示。

尽管亚热带地区林火发生的数量是北方地区的数倍<sup>[21]</sup>,但是目前大多数研究在北方林区火烧迹地展开,对亚热带季风区林火影响的研究较少<sup>[20]</sup>。由于温度和降水等气候条件的差异,亚热带季风区森林土壤的凋落物和有机质层厚度不及北方林区,火烧后未燃烧完全的有机物以及随灰分进入土壤的矿质元素均相对较少,导致火烧后亚热带森林表层土壤的有机碳和矿质元素的含量变化不显著,而N等易因高温而挥发的元素含量则可能会显著降低,因此,推测林火对森林土壤性质的影响在两个地区可能存在显著差异。

四川省凉山彝族自治州西昌市位于我国西南地区,属于典型亚热带西南季风气候区,林分为云南松和桉树。2020年的“3·30”火灾导致西昌市经久乡人工林受到不同强度的火烧干扰,是研究亚热带林火对土壤影响的理想区域。本文以西昌“3·30”火灾地区未过火、低度、中度和重度火烧迹地土壤为实验对象,研究不同火烧强度对土壤容重、pH值、有机碳和主要矿质养分的影响,并与国内外已有研究结果进行对比分析,探究不同火烧强度对亚热带西南季风区森林土壤有机碳库和养分状况的影响程

度。研究成果不仅有助于认清亚热带西南季风林区不同火烧强度对森林土壤的影响,阐明林火干扰对我国森林土壤影响的空间格局,而且可为该区域火烧迹地植被恢复的养分管理提供科学依据,具有较明确的科学意义和一定的应用价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省凉山彝族自治州西昌市经久乡(27°46'51"~21°53'21" N, 102°11'55"~102°17'55" E)。经久乡以山地为主,海拔在1500~2510 m之间,气候为典型的西南季风,年均温为17℃,年均降雨量为1013.5 mm,日最大降雨量为199.5 mm。雨季为5月至10月,降雨主要以夜间暴雨为主,约占全年降雨量的90%。2020年“3·30”火灾前,研究区森林植被覆盖率超过90%,优势物种为云南松和桉树,土壤主要为紫色土和黄壤。样地土壤为紫色土,属风化发育较浅的矿质土壤,由中生代紫色砂页岩风化而成,常见于四川盆地;凋落物层厚度不超过3 cm,土壤有机质含量较低、结构性差、蓄保水能力较弱。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样地设置** 本研究于2021年3月选取海拔、坡度和坡向相似的火烧迹地设置5 m×5 m的样地。根据火烧程度将样地分为低度火烧(L)、中度(M)、重度(H)火烧迹地,同时选择临近未过火区域设置对照样地。每个强度设置5个重复。火干扰强度划分依据为乔灌草烧伤的比例、火焰高度、植物燃烧程度、土壤有机质层的被影响程度<sup>[22-23]</sup>,详见表1。

表1 样地火烧强度划分标准

Table 1 Definition of fire intensity

强度	划分标准
Strength	Classification criteria
低度火烧	树干熏黑高度≤2 m;火焰高度≤1.5 m;烧死数目≤30%;林下林分烧毁≤50%
中度火烧	树干熏黑高度2~3 m;火焰高度1.5~3 m;烧死数30%~70%;林下林分烧毁50%~70%
重度火烧	树干熏黑高度≥3 m;火焰高度≥3 m;烧死数≥70%;林下林分烧毁≥70%

**1.2.2 样品采集** 采用五点取样法在每块样地上采集土样,土壤采集深度为0~20 cm。

每个样方中的样品混匀为一个样品,得到的土

样使用干净的自封袋保存,储存于 0~4℃ 的保温箱中。土壤样品采集完成后立刻带回实验室过 2 mm 筛。用于测定容重的样品经 105℃ 烘干;用于测定其他理化指标的样品低温(35℃)烘干。

### 1.3 样品分析

分别采用环刀法和电位法(METTLER TOLEDO S210)测定土壤容重和 pH 值。采用元素分析仪(Elementar Trace SN cube)测定土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)和全氮含量。对钾(Kalium, K)、钙(Calcium, Ca)、镁(Magnesium, Mg)和 P 等养分元素,经微波消解后,采用火焰光度法测定全 K, Ca 和 Mg 的含量,采用钼锑抗比色法测定全磷(Total phosphorus, TP)含量。分别采用碱解扩散法、乙酸铵浸提-火焰光度法和碳酸氢钠浸提-钼蓝比色法测定碱解 N、速效 K 和速效 P 含量<sup>[24]</sup>。

### 1.4 数据分析

使用 SPSS 20.0 进行数据统计分析,测试指标采用均值±标准差的形式呈现。采用单因素方差法(ANOVA)分析不同火烧程度对土壤性质的影响。采

用 LSD 方法进行两两差异检验。数据的残差满足正态分布、方差齐性和独立性等 ANOVA 分析的前提条件。对呈正态分布的土壤指标,采用 Pearson 系数表征各指标之间的相关性。由于 Ca 和 Mg 进行对数转换后仍不满足正态分布,因此,采用 Spearman 法分析 pH 值与三种碱基离子(Ca, Mg 和 K)之间的相关性。除特别说明,显著性水平设置为  $P=0.05$ 。采用 OriginPro2022(学生版)绘制图件。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤容重和 pH 值

尽管轻度和中度火烧对土壤容重的影响不显著,但是重度火烧迹地的土壤容重极显著高于对照、轻度和中度火烧样地( $P<0.01$ , 图 1a), 分别增加了 12.0%, 9.0% 和 10.0%。重度火烧后土壤容重增加的趋势与北半球大多数火烧迹地的结果一致(图 2a)。三个火烧程度对土壤 pH 的影响均不显著(图 1b), 与热带和亚热带大多数样点的变化趋势一致, 但与北温带部分火烧迹地 pH 升高的趋势不一致(图 2b)。

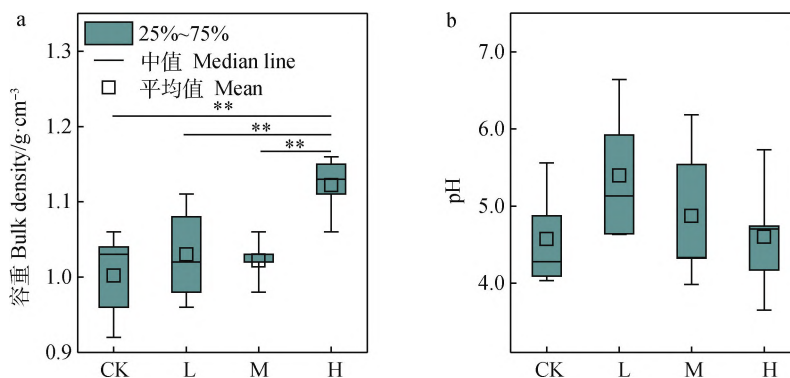


图 1 不同火干扰下土壤容重(a)和 pH 值(b)

Fig. 1 Bulk density (a) and pH value (b) of soils under different fire disturbances

注:CK 代表对照样地。L, M 和 H 分别代表轻、中和重度火烧迹地。\*\* 表示不同火烧程度土壤容重和 pH 在  $P<0.01$  水平上显著差异。下同  
Note: CK represents control plots. L, M and H represent light, medium and heavy intensity of fire disturbance respectively. \*\* indicates the significant difference in the bulk density and pH in soils under different fire disturbance ( $P<0.01$ ). The same as below

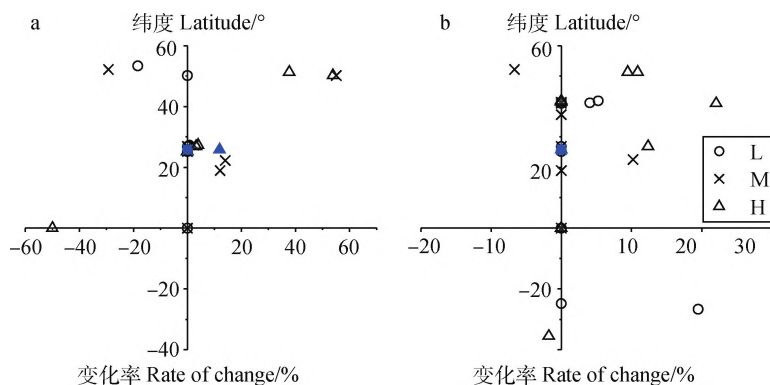


图 2 不同火干扰强度对土壤容重(a)和 pH 值(b)的影响

Fig. 2 Effects of different fire disturbances on soil bulk density (a) and pH value (b) with latitude

注:实心数据为本研数据,空心数据为文献数据,引自参考文献<sup>[2,10-11,13-15,17-20,25-29]</sup>

Note: Solid symbols: data of this study; open symbols: data from references <sup>[2,10-11,13-15,17-20,25-29]</sup>

### 2.2 土壤有效养分

火烧显著增加了土壤速效 P 和速效 K 的含量,显著降低了土壤碱解 N 含量(图 3a,b,c)。轻度、中度和重度火烧迹地的土壤速效 P 含量分别比对照样地增加了 142%,197%和 183%,但三种火烧迹地的速效 P 含量无显著差异(图 3a)。火烧程度对土壤速效 K 含量具有显著影响。随着火烧程度的增加,土壤速效 K 含量呈逐渐升高的趋势,重度火烧迹地速效 K 含量是对照样地的 1.9 倍

(图 3c)。与土壤速效 P 和速效 K 相反,火烧导致土壤碱解 N 含量显著下降。轻度、中度和重度火烧迹地碱解 N 相较对照分别显著减少了 34.6%,27.7%和 45.7%(图 3b),但土壤碱解 N 的含量在三种火烧程度间无显著差异。火烧导致西昌林地土壤速效 P 和速效 K 增加的趋势则与北半球大多数样点的趋势一致(图 4a,c),而碱解 N 减少的趋势与北半球中纬度地区大多数火烧迹地的趋势相反(图 4b)。

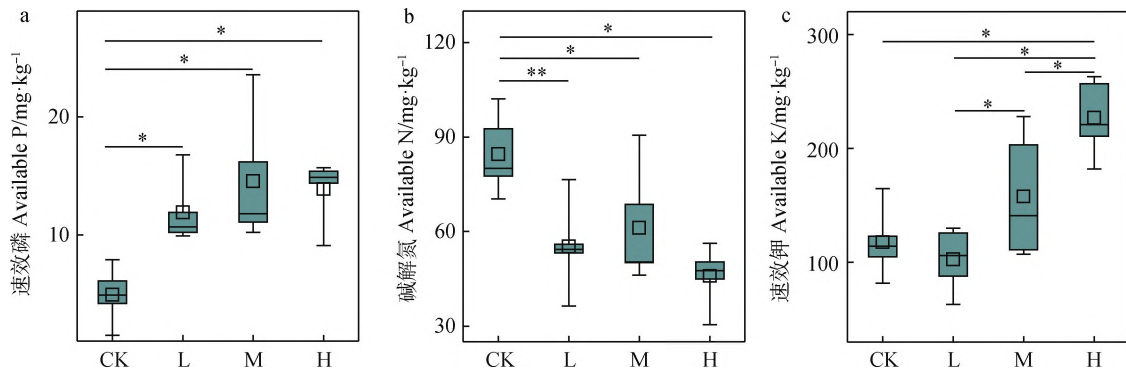


图 3 不同火干扰下土壤速效磷(a)、碱解氮(b)和速效钾(c)

Fig. 3 Available phosphorus (a),nitrogen (b) and potassium (c) in soil under different fire disturbances

注:图中 \* 表示不同火烧程度下土壤理化性质在  $P < 0.05$  水平上显著差异。下同

Note: \* indicates the difference in soils chemical properties under different fire disturbance at  $P < 0.05$ . The same as below

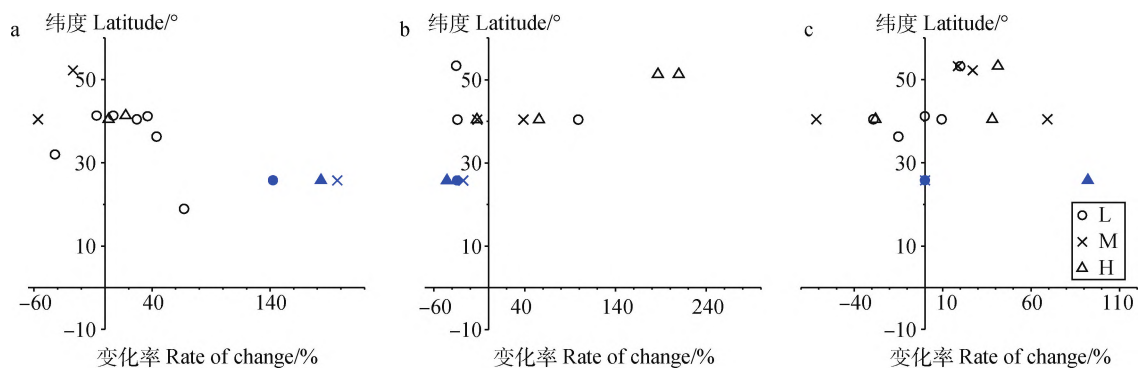


图 4 不同火干扰对土壤(a)速效磷、(b)碱解氮和(c)速效钾的影响

Fig. 4 effects of different fire disturbances on soil (a) phosphorus, (b) available nitrogen and (c) potassium with latitude

注:图中实心数据为本研究数据,空心数据为文献数据,引自参考文献<sup>[11,16-18,29-35]</sup>

Note: Solid symbols are data of this study; open symbols are data from references<sup>[11,16-18,29-35]</sup>

### 2.3 土壤养分含量

火烧显著降低了土壤 TN 含量,且随着火烧程度的增加,TN 含量逐渐降低(图 5a)。重度火烧后土壤 TN 含量较对照减少了 44.7%。三种火烧程度均未显著改变土壤 Ca,Mg,K,P 和 SOC 的含量(图 5b,5c,5d,5e,5f)。土壤无机 P 和有机 P 含量均未受到火烧强度的显著影响(图 6a,6b)。西昌火烧迹地 SOC 含量未显著变化的趋势

与北半球部分火烧迹地的趋势一致(图 7a)。目前对火烧导致 SOC 含量变化的趋势尚未取得一致认识(图 7a)。重度火烧迹地土壤 TN 含量减少的趋势与北温带大多数已有研究结果基本一致,轻度和中度火烧迹地中 TN 不变的趋势与亚热带和热带的研究结果一致(图 7b)。与 SOC 相同,火烧程度对土壤 TP 的影响也尚无较为一致的结论(图 7c)。



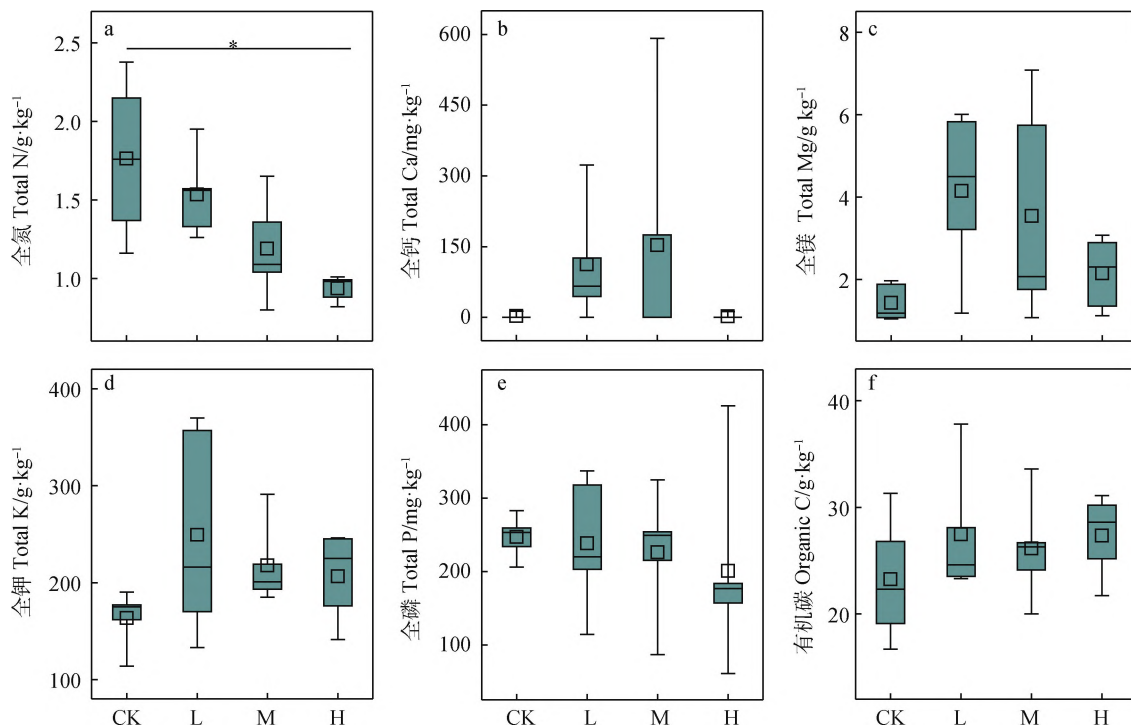


图 5 不同火干扰下泸山土壤全氮(a)、全钙(b)、全镁(c)、全钾(d)、全磷(e)和有机碳(f)含量

Fig. 5 Total nitrogen (a), total calcium (b), total magnesium (c), total potassium (d), total phosphorus (e) and soil organic carbon (f) in soil under different fire disturbances

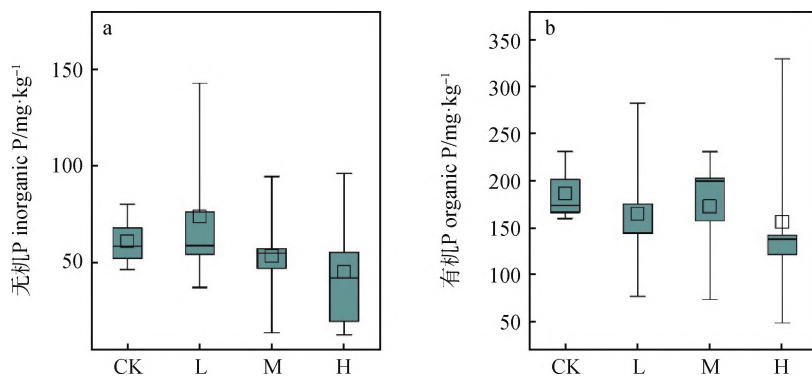


图 6 西昌“3·30”火烧迹地土壤无机磷(a)和有机磷(b)含量

Fig. 6 Concentration of inorganic phosphorus (a) and organic phosphorus (b) in soil under different fire disturbance

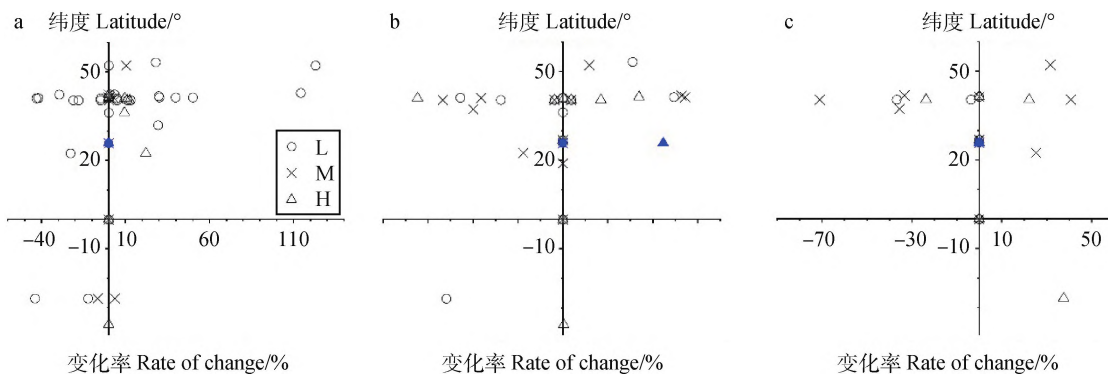


图 7 不同火烧程度对土壤有机碳(a)、全氮(b)和全磷(c)的影响

Fig. 7 Effects of different fire disturbances on soil organic carbon (a), total nitrogen (b) and phosphorus (c) in soil with latitude  
注:图中实心数据为本研究数据,空心数据为文献数据,引自参考文献[2,10,11,13,14,16-19,27,30,31,33,34,36-43]

Note: Solid symbols indicate data of this study; open symbols indicate data from references [2,10,11,13,14,16-19,27,30,31,33,34,36-43]

## 2.4 土壤理化指标之间的关系

土壤容重与碱解 N 含量呈极显著负相关关系,与速效 K 含量呈极显著正相关关系(表 2)。速效 P 与速效 K 含量呈显著正相关关系,但与 TP、有机 P

和无机 P 含量无显著相关关系。TN 与碱解 N 含量之间呈显著正相关关系。土壤 pH 值与 3 种碱基离子(Ca, Mg 和 K)含量之间无显著相关关系(数据未在表 2 中展示)。

表 2 土壤理化指标之间的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson's correlation coefficients between soil physical and chemical properties

	pH	SOC	TN	TP	速效 P	碱解 N	速效 K	无机 P	有机 P
容重	0.12	0.01	-0.40	0.04	0.23	-0.61**	0.65**	0.10	0.01
SOC			0.06	0.31	0.32	-0.12	0.14	0.30	0.27
TN				0.23	-0.48*	0.51*	-0.34	0.28	0.17
TP					0.08	0.04	0.02	0.76**	0.96**
速效 P						-0.30	0.54*	0.01	0.09
碱解 N							-0.33	-0.07	0.09
速效 K								-0.15	0.09
无机 P									0.53*

注: \* 代表在  $P < 0.05$  的水平上显著, \*\* 代表在  $P < 0.01$  的水平上显著

Note: \* and \*\* represent the correlation at the level of  $P < 0.05$  and  $P < 0.01$ , respectively

## 3 讨论

### 3.1 土壤容重和 pH 值

火烧使土壤容重增加的原因主要包括使土壤孔隙变小<sup>[12]</sup>、破坏土壤团聚体和土壤有机质大量流失<sup>[44]</sup>。由于本研究中三种程度的火烧均未导致 SOC 显著降低(图 5f),因此,容重的变化很有可能是火烧对土壤物理结构的影响造成的。轻和适度火烧尚不足以对矿质土壤层的孔隙等物理结构造成影响,可能是这两种火烧强度下土壤容重未发生变化的主要原因。

西昌“3·30”火烧迹地土壤 pH 值对三种火烧强度的响应都不显著,可能与纬度导致的气候和土壤理化性质的差异有关。目前的研究认为灰分中的 Ca 和 Mg 离子等进入土壤中导致土壤碱性阳离子含量增加<sup>[12-13,39]</sup>,土壤有机酸在火灾中发生变性和凋落物在燃烧过程中脂肪族化合物的释放是火烧导致土壤 pH 值增大的主要原因<sup>[43,45]</sup>。与年均温相对较低的北方林区相比,亚热带西南季风区的森林土壤风化程度更高,凋落物和有机质层更薄,有机酸含量也更低,如本研究区土壤有机质层仅 0~3 cm,使得上述三个增加 pH 值的机制在亚热带地区发挥的作用较为有限。本文发现火烧后三种碱基离子(Ca, Mg 和 K)的含量均未显著升高(图 5b, 5c, 5d)也可证明火烧后随灰分进入土壤的碱性阳离子相对较少。此外, pH 值与三种碱基离子之间无显著相关性也说明北方林区发现的火干扰对土壤 pH 值的作用机制不适用于西南亚热带林区。

### 3.2 土壤有机碳

火烧强度对土壤 SOC 含量无显著影响(图 2 d)也可能与纬度引起的气候条件的不同具有一定关系。对前人研究结果的总结发现,火烧扰动后,从赤道到南半球的样点,土壤 SOC 总体减少;而北半球的情况与之相反,随着纬度增加,更多样点的 SOC 趋向增加,少部分不变或减少(图 7a)。与本文纬度接近的西班牙东北部萨拉戈萨市的火烧迹地<sup>[36]</sup>,其 SOC 含量有所降低。先前的研究认为,火烧后未完全燃烧凋落物进入土壤后会导致土壤 SOC 含量增加<sup>[31,40,46-47]</sup>。这可能主要由于其研究区多位于纬度较高、相对寒冷的地区,凋落物层和有机质层较厚。由于本文研究区温度较高,凋落物分解速率较快,火烧前凋落物层较薄,火烧造成的未完全燃烧的凋落物含量较少,因此,未完全燃烧凋落物向土壤输入的 SOC 较为有限。另一方面,火烧导致土壤完全裸露,本文采样时间为火烧后一年,雨季时径流还会导致 SOC 流失。综上,较高的温度、较薄的有机质层和较集中的降雨可能是未观测到火烧强度对土壤 SOC 有显著影响的主要原因。

### 3.3 土壤养分

土壤温度超过 200℃,土壤 N 会直接挥发到空气而发生损耗;当土壤温度超过 500℃,土壤 N 几乎全部消失<sup>[48]</sup>。因此,林火不仅可导致土壤中原有的 N 因高温挥发,而且会引起植物和凋落物燃烧过程中 N 的挥发,导致随灰分输入土壤的 N 数量较少,进而导致火烧后土壤 TN 含量降低。强度越大的火烧干扰,持续时间更长,可能导致土壤中更多的 N

流失。因此,我们观察到随着火烧强度的增加,土壤 TN 显著降低(图 5a)。此外,火烧常导致土壤有机 N 转化为无机 N<sup>[11,39]</sup>,而无机 N 的溶解性较高,易随径流流失,导致土壤 N 含量进一步较少<sup>[49]</sup>。尽管部分研究发现火干扰并未降低土壤 TN 和碱解 N 含量<sup>[29,32,34]</sup>,但这些研究的数量相对较少(图 7b)。

与 N 不同,高温条件下 P 不易挥发。土壤对 P 的吸附作用较强,使得 P 随径流流失的量也较为有限。这些可能是西昌火烧迹地土壤 TP 含量变化较小的主要原因。速效 P 含量的增加一方面是由于植物和凋落物燃烧后灰分中的无机 P 进入土壤<sup>[47,50,51]</sup>,另一方面则是火烧促进土壤有机 P 转化为无机 P<sup>[51]</sup>。不过,由于速效 P 的最大增幅仅 15 mg·kg<sup>-1</sup>左右(图 2a),占未过火土壤 TP 的比例不到 6%,因此,速效 P 的增加并未导致 TP 含量显著升高。此外,速效 P 与 TP、无机 P 和有机 P 之间无显著相关性(表 2),也说明速效 P 的变化对 TP 的影响有限。

与 TP 的变化类似,三种强度的火烧均未导致土壤 K 含量发生显著变化(图 5d),与 Badia、刘冠宏等的结果一致<sup>[33,36]</sup>,但纬度更高的大多数研究均发现各个火烧强度下 K 含量有所升高<sup>[18,31]</sup>。这种差异可能是由于北方地区凋落物更多,燃烧后向土壤输入的 K 更多造成的。不过,尽管研究区的凋落物相对较少,但其完全燃烧后仍可向土壤输入一定量的 K,因此,高强度火烧迹地的速效 K 含量显著高于未过火样地(图 3c)。重度火烧导致土壤速效 K 含量增加的这种趋势,与绝大多数研究的结果较为一致(图 4c)。轻度火烧样地中速效 K 并未增高一方面可能是由于随灰分输入的 K 更少,另一方面可能是相较于重度火干扰,轻度火烧迹地保存着较好植被,火烧后植被生长过程中需吸收大量速效 K<sup>[39]</sup>。

三种火烧程度对土壤 Ca 和 Mg 含量的影响不显著,可能是由于亚热带季风气候导致研究区土壤风化程度较高,pH 值较低,土壤 Ca 和 Mg 含量与北方地区相比较低,部分未过火样地土壤的 Ca 浓度甚至低于检测限(图 5b,5c),植物和凋落物中 Ca 和 Mg 含量也较低,因此,随灰分返回土壤的 Ca 和 Mg 含量均较为有限。此外,由于 Ca 和 Mg 等碱基离子较易随水流流失,而本研究是在火烧一年后采集样品,因此,Ca 和 Mg 未显著变化也可能与雨季导致碱基离子的流失有关<sup>[52]</sup>。尽管部分研究发现火烧后土壤 Ca 和 Mg 含量均显著上升<sup>[39]</sup>,但这些

研究均位于纬度更高、凋落物和有机质层更厚的北方地区,其更丰富的燃烧物和相对更少的降水更可能导致土壤 Ca 和 Mg 含量增加。

## 4 结论

本研究利用四川西昌“3·30”火烧迹地和文献数据对比分析了不同纬度火烧迹地土壤理化性质的变化,揭示了林火对亚热带与北方针叶林区土壤显著不同的干扰特征。与北方针叶林相比,火烧强度对西南亚热带森林土壤 SOC, Ca, Mg, K 和 P 含量以及 pH 的影响不显著,但是,与北方林区一致,林火显著降低了易随高温挥发的土壤 TN 和碱解 N 的含量。本文的研究结果不仅丰富了林火生态学的研究案例,而且可为亚热带地区森林火烧迹地植被恢复过程中的养分管理提供科学依据。

## 参考文献

- [1] DEVINEAU J L, FOURNIER A, NIGNAN S. Savanna fire regimes assessment with MODIS fire data: Their relationship to land cover and plant species distribution in western Burkina Faso (West Africa) [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(9):1092-1101
- [2] ALCANIZ M, OUTEIRO L, FRANCO M, et al. Effects of prescribed fires on soil properties: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 613:944-957
- [3] MANSOOR S, FAROOQ I, KACHROO M M, et al. Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301:113769
- [4] ABATZOGLOU J T, WILLIAMS A P. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(42):117:70-75
- [5] 李威, 周梅, 赵鹏武, 等. 大兴安岭东麓火烧迹地恢复初期植被特征[J]. *东北林业大学学报*, 2020, 48(1):51-55
- [6] THONICKE K, VENEVSKY S, SITCH S A, et al. The role of fire disturbance for global vegetation dynamics: coupling fire into a Dynamic Global Vegetation Model [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2008, 106:61-77
- [7] 刘发林, 陈小伟, 曾素平, 等. 火干扰对森林土壤斥水性的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2019, 39(5):1846-1852
- [8] 陆刚, 黄海霞, 周晓雷, 等. 迭部林区云冷杉林火烧迹地土壤有机碳及酶活性变化特征[J]. *草地学报*, 2022, 30(4):943-949
- [9] 赵凌平, 魏楠, 谭世图, 等. 冬季火烧对黄土高原典型草原群落特征及土壤特征的影响[J]. *草地学报*, 2018, 26(3):576-583
- [10] ONDIK M M, BENNELL M, DAVIES R J, et al. Fire and land use impact soil properties in a Mediterranean dry sclerophyll woodland [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 324:116245

- [11] ARUNRAT N, SEREENONCHAI S, HATANO R. Effects of fire on soil organic carbon, soil total nitrogen, and soil properties under rotational shifting cultivation in northern Thailand [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 302: 113978
- [12] HINOJOSA M B, ALBERT-BELDA E, GÓMEZ-MUNOZ B, et al. High fire frequency reduces soil fertility underneath woody plant canopies of Mediterranean ecosystems [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141877
- [13] AKBURAK S, SON Y, MAKINECI E, et al. Impacts of low-intensity prescribed fire on microbial and chemical soil properties in a *Quercus frainetto* forest [J]. *Journal of Forestry Research*, 2018, 29(3): 687-696
- [14] DOWNING T, IMO M, KIMANZI J K, et al. Effects of wildland fire on the tropical alpine moorlands of Mount Kenya [J]. *Catena*, 2017, 149: 300-308
- [15] 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: 95-104
- [16] VERMA S, SINGH D, SINGH AK, et al. Post-fire soil nutrient dynamics in a tropical dry deciduous forest of Western Ghats, India [J]. *Forest Ecosystems*, 2019, 6(1): 6
- [17] GABBASOVA IM, GARIPPOV T, SULEIMANOV RR, et al. The Influence of Ground Fires on the Properties and Erosion of Forest Soils in the Southern Urals (Bashkir State Nature Reserve) [J]. *Eurasian Soil Science*, 2019, 523: 70-79
- [18] 王伟, 张兴龙, 窦旭, 等. 中度火干扰对兴安落叶松林土壤磷和钾元素的影响[J]. *森林工程*, 2020, 36(1): 10-18
- [19] LIU J, QIU L, WANG X, et al. Effects of wildfire and topography on soil nutrients in a semiarid restored grassland [J]. *Plant and Soil*, 2018, 428(1): 123-136
- [20] ZHAO J, WANG J, MENG Y, et al. Spatiotemporal patterns of fire-driven forest mortality in China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 529: 120678
- [21] FANG K, YAO Q, GUO Z, et al. ENSO modulates wildfire activity in China [J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1764
- [22] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 等. 林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2020, 40(6): 1839-1850
- [23] 田晓瑞, 王明玉, 殷丽, 等. 大兴安岭南部长春火行为特征及可燃物消耗[J]. *林业科学*, 2009, 45(3): 90-95
- [24] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000: 158-160
- [25] 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
- [26] 韩春兰, 邵帅, 王秋兵, 等. 兴安落叶松林火干扰后土壤有机碳含量变化[J]. *生态学报*, 2015, 35(9): 3023-3033
- [27] 罗斯生, 罗碧珍, 魏书精, 等. 中度火灾一年后马尾松林土壤碳库特征[J]. *林业科学*, 2022, 58(9): 25-35
- [28] MOIR J, TIESSEN H. Characterization of Available P by Sequential Extraction [C]//CATER M, GREGORICH E. *Soil Sampling and Methods of Analysis 2nd Edition*, Boca Raton: CRC Press, 2007: 75-86
- [29] 宋利臣, 何平平, 崔晓阳. 重度林火对大兴安岭土壤生境因子的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(7): 1809-1814
- [30] FRANCOS M, STEFANUTO EB, ÚBEDA X, et al. Long-term impact of prescribed fire on soil chemical properties in a wildland-urban interface. Northeastern Iberian Peninsula [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 305-311
- [31] 芮淑君, 牛树奎, 陈锋, 等. 冀北辽河源自然保护区油松林火烧迹地土壤化学性质研究[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 53(5): 582-586
- [32] KONG J J, YANG J, BAI E. Long-term effects of wildfire on available soil nutrient composition and stoichiometry in a Chinese boreal forest [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 1353-1361
- [33] 刘冠宏, 李炳怡, 宫大鹏, 等. 林火对北京平谷区油松林土壤化学性质的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2019, 41(2): 29-40
- [34] 李炳怡, 刘冠宏, 李伟克, 等. 不同火强度对河北平泉油松林土壤有机碳及土壤养分影响[J]. *生态科学*, 2018, 37(4): 35-44
- [35] 周司涵, 张韞, 崔晓阳. 兴安落叶松林火烧迹地土壤速效钾时空动态分析[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(5): 141-147
- [36] BADÍA D, MARTÍ C, AGUIRRE Á J, et al. Wildfire effects on nutrients and organic carbon of a Rendzic Phaeozem in NE Spain: Changes at cm-scale topsoil [J]. *Catena*, 2014, 113: 267-275
- [37] MUQADDAS B, ZHOU X, LEWIS T, et al. Long-term frequent prescribed fire decreases surface soil carbon and nitrogen pools in a wet sclerophyll forest of Southeast Queensland, Australia [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 536: 39-47
- [38] HAHN G, COATES A, AUST W. Soil Chemistry following Single-Entry, Dormant Season Prescribed Fires in the Ridge and Valley Province of Virginia, USA [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2021, 52(17): 521-529
- [39] 李伟克, 刘晓东, 牛树奎, 等. 火烧对河北平泉油松林土壤微生物量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(10): 70-77
- [40] MOYA D, GONZÁLEZ-DE VEGA S, LOZANO E, et al. The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of *Pinus halepensis* Mill. stands in the short and mid-terms after wildfire [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 235: 250-256
- [41] 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[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(2): 29-36
- [42] ADKINS J, SANDERMAN J, MIESEL J. Soil carbon pools and fluxes vary across a burn severity gradient three years after wildfire in Sierra Nevada mixed-conifer forest [J]. *Geoderma*, 2019, 333: 10-22
- [43] PANICO S C, MEMOLI V, SANTORUFO L, et al. Soil biological responses under different vegetation types in Mediterranean area [J]. *International Journal of Environmental Re-*



- search and Public Health,2022,19(2):903
- [44] 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):1419-1441
- [45] LI W, NIU S, LIU X, et al. Short-term response of the soil bacterial community to differing wildfire severity in Pinus tabulaeformis stands[J]. Scientific Reports,2019,9(1):1148
- [46] 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
- [47] RAKSHIT A, ABHILASH P C, SINGH H B, et al. Adaptive soil management: From theory to practices [M]. Kallang: Springer singapore,2017:465-476
- [48] 朱光艳, 胡同欣, 李飞, 等. 火后不同年限兴安落叶松林土壤氮的矿化速率及其影响因素[J]. 中南林业科技大学学报,2018,38(3):88-96
- [49] 吕贻忠, 李保国. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社,2006: 85-96
- [50] ALCANIZ 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
- [51] CERTINI G. Effects of fire on properties of forest soils: a review[J]. Oecologia,2005,143(1):1-10
- [52] PELLEGRINI A F A, AHLSTRÖM A, HOBBIE S E, et al. Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity[J]. Nature,2018,553(7687): 194-198

(责任编辑 闵芝智)